



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**PROCESNÍ PARAMETRY PŘI NAVAŘOVÁNÍ INCONELU  
625**

PROCEDURAL PARAMETERS AT INCONEL 625 CLADDING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Hrádek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jaroslav Kubíček**

**BRNO 2021**

# Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jan Hrádek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Procesní parametry při navařování Inconelu 625

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Energetika, vytápění a spalovny se neobejdou bez kotlů s membránovými stěnami. Jsou to trubkové systémy pro výrobu páry ve vnitřních prostorách kotlů. Korozní a erozivní opotřebení trubkových systémů je možné výrazně snížit návary niklovými slitinami, z nichž nejvýznamnější je slitina INCONEL 625. Diplomová práce řeší návrh svařovacích parametrů pro ekonomicky efektivní realizaci návarů membránových stěn.

### Cíle diplomové práce:

- vypracovat literární studii svařování metodou MIG–CMT a svařitelnosti niklových slitin,
- posoudit parametry navařování, které mají vliv na ekonomiku procesu,
- navrhnout a experimentem optimalizovat parametry,
- provést a vyhodnotit experiment,
- vypracovat postupy navařování – WPS.

### Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

DVOŘÁK, Milan. a kolektiv. Technologie II, 2. vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

ONDREJČEK, Peter. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

HRÁDEK Jan: Procesní parametry pro navařování Inconelu 625

---

Výzkum je zaměřen na navařování inconelu 625 metodou MAG - CMT. Bylo zjištěno, že navařování bez rozkyvu nevytváří potřebnou geometrii pro navázání dalších vrstev. Při navařování s rozkyvem bylo vyzkoumáno, že nejvhodněji se jeví proud v rozmezí 150 až 200 A v synergickém režimu pro navařování inconelu 625. Výsledný návar byl proveden při proudu 190 A s korekcí pulzní dynamiky nastavenou na -4 a korekcí délky oblouku na +10 a rychlostí svařování 315 mm za minutu. Návar nebyl ideální především kvůli nedostatečné výšce. Zlepšení výsledků by mohlo být dosaženo nastavením rozkyvu s plynulou změnou zrychlení. Z časových možností a z náročnosti programování byla však pro všechny experimenty zvolena pouze rychlost konstantní.

Klíčová slova: Inconel 625, CMT, navařování, membránové stěny, procesní parametry

## ABSTRACT

HRÁDEK Jan: Procedural parameters at Inconel 625 cladding

---

The research is focused on cladding of inconel 625 using the MAG - CMT method. It was found that welding without an oscillation does not create the necessary geometry to establish additional layers. When welding with an oscillation, it was researched that the current between 150 and 200 A appears most appropriate in the synergistic mode for welding inconel 625. The resulting weld bead was made at a current of 190 A with pulse dynamics correction set to -4 and correction of arc length to +10 and welding speed of 315 mm per minute. The weld bead was not ideal mainly due to insufficient height. The improvement of results could be achieved by set oscillation with fluent change in acceleration. Because of the time options and difficulty of programming it was used only constant speed for all experiments.

Keywords: Inconel 625, CMT, cladding, membrane walls, procedural parameters

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HRÁDEK, Jan. *Procesní parametry při navařování Inconelu 625* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132400>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V ..... dne 21.5.2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Jaroslavu Kubíčkovi a panu Janu Zouharovi, kteří mi pomohli experiment uskutečnit. Hlavně děkuji za jejich ochotu provádět experimenty až do pozdních hodin nad rámec jejich pracovní docházky.

Dále děkuji rodičům, kteří mě finančně podporovali během celého mého studia a společně s mojí rodinou mě psychicky podporovali.

# OBSAH

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

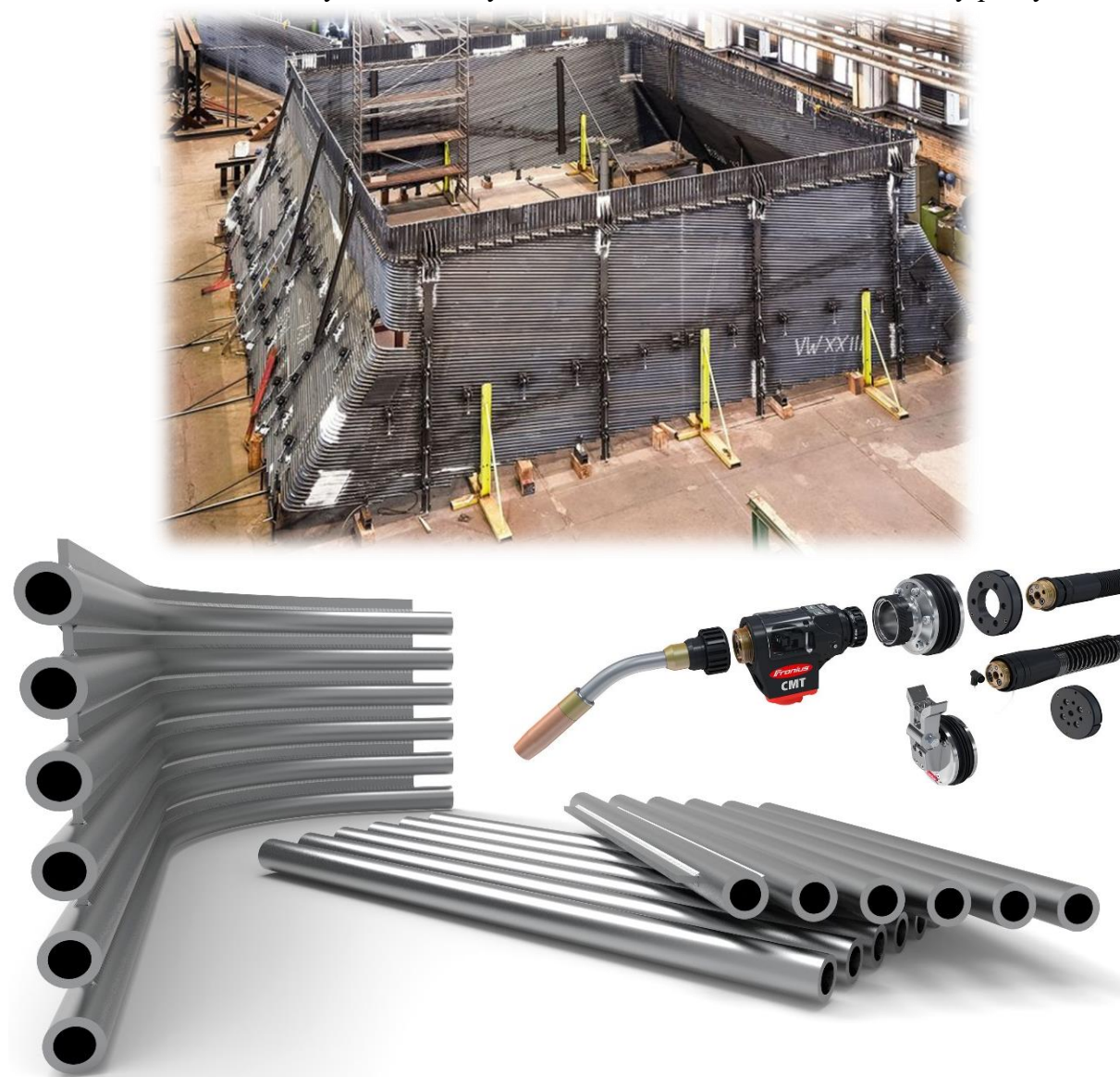
|  | Str. |
|--|------|
| ÚVOD .....   | 9    |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ.....                               | 10   |
| 2 SVAŘOVÁNÍ A NAVAŘOVÁNÍ.....                      | 12   |
| 2.1 Rozdělení metod svařování .....                | 13   |
| 2.2 Teorie obloukových metod.....                  | 14   |
| 2.3 Technologie MIG/MAG.....                       | 17   |
| 2.3.1 Zařízení pro svařování metodou MIG/MAG ..... | 18   |
| 2.3.2 Přídavné materiály .....                     | 21   |
| 2.3.3 Způsoby přenosu kovu.....                    | 22   |
| 2.3.4 Metoda CMT a její modifikace .....           | 25   |
| 2.3.5 Svařovací parametry .....                    | 28   |
| 3 NIKL A JEHO SLITINY .....                        | 30   |
| 3.1 Superslitiny niklu.....                        | 32   |
| 3.2 Svařování niklových slitin.....                | 34   |
| 4 PRAKTICKÁ ČÁST .....                             | 35   |
| 4.1 Inconel 625 .....                              | 36   |
| 4.2 Výroba membránových stěn.....                  | 37   |
| 4.3 Experiment .....                               | 40   |
| 4.3.1 Metodika navařování .....                    | 42   |
| 4.3.2 Návary bez rozkyvu.....                      | 44   |
| 4.3.3 Návary s rozkyvem .....                      | 45   |
| 4.3.4 Navařování s rozkyvem 2.....                 | 59   |
| 5 Závěry .....                                     | 60   |

Seznam použitých zdrojů  
Seznam použitých symbolů a zkratk  
Seznam obrázků  
Seznam grafů  
Seznam tabulek  
Seznam příloh



## ÚVOD [1] [2] [3]

Vnitřní stěny kotlů pro energetický průmysl jsou tvořeny takzvanými membránovými stěnami. Tyto stěny jsou tvořeny trubkami a plochými tyčemi. Navzájem jsou spojovány svary. Trubkami proudí pod vysokým tlakem pára, která může dosahovat teploty okolo 600 °C. Teplota uvnitř kotle může být až 1200 °C. Stěny musí odolávat korozní atmosféře v kouřových plynech, musí mít vyhovující mez pevnosti při vysokých teplotách, dobrou tepelnou vodivost, co nejnížší tepelnou roztažnost, odolávat abrazivním účinkům a je také zapotřebí dobrá svařitelnost. Pro představu velikosti uvádím výhřevnou plochu kotle v elektrárně Chvaletice, která činí 33403 m<sup>2</sup>. Pro dosažení co největší účinnosti v elektrárnách je zapotřebí zvednout teplotu páry, což znamená zároveň zlepšit vlastnosti membránových stěn. Jednou z metod, jak tohoto docílit je úprava povrchu. Pro úpravu povrchu byl vybrán materiál na bázi niklu, Inconel 625. Tento materiál lze navařovat metodou MIG – CMT, která je patentována firmou FRONIUS a dosahuje vysokých rychlostí navařování. Na obrázcích 1,2 a 3 je vidět hořák na metodu MIG – CMT, bloky membránových stěn a šroubovitě membránové stěny při výrobě.

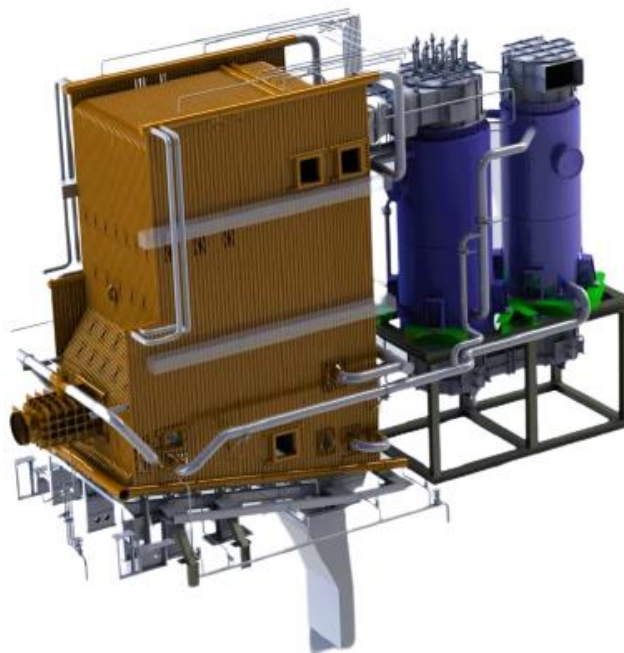


Obr. 1 Hořák CMT a ukázky membránových stěn [4] [5][vlastní tvorba]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [3] [6] [7] [8]

V energetickém průmyslu jsou hojně využívány parní kotle. Ty mají tři hlavní části. Ohřívač, výparník a přehřívák. Spalovat je možné kromě klasických paliv také odpady. Odpady jsou spalovány pro usnadnění jejich likvidace a po procesu spalování mohou být použity pro jiné účely. Vzniklé teplo je využíváno pro výrobu elektrické energie nebo pro vytápění okolních domovů. V závislosti na druhu odpadů vznikají různé škodlivé látky, které jsou vysoce agresivní a běžné materiály používané v jiných typech elektráren by byly velice rychle zničeny. Z těchto důvodů je možné na klasické materiály navařit ochranný povrch ze slitin, které tomuto prostředí odolávají mnohem lépe.

Velké kotle jsou vyrobeny ve většině případů z membránových stěn. Tyto stěny vytváří celkový tvar kotle a zároveň slouží jako výparník. Stěny mohou být sestaveny horizontálně, vertikálně nebo šroubovitě. Uvnitř kotle jsou stěny v přímém kontaktu se spaliny. Ty mají vysokou rychlost a teplotu, čímž způsobují korozní a erozivní opotřebení. Na obrázku 2 je vidět model kotle s vertikálním uspořádáním membránových stěn a na obrázku 3 je vidět tento kotel již vyrobený. Na reálném kotli je vidět, že je složen z mnoha různých prvků, které spojují stěny tak, aby pára uvnitř trubek mohla proudit co nejjednodušší. Otvory slouží pro kontrolovaný přívod vzduchu a paliva. Stěny kotle nejsou jen přímé, některé jsou i ohnuté. Ty se vyrábějí z hotového bloku, který je celý ohnut. Pokud jsou povrchově upravovány, aby vydrželi velká zatížení koroze za vysokých teplot a erozi ohnout je nelze, kotel musí být konstrukčně navrhnout tak, aby zde tyto ohyby nebyly anebo je povrchová úprava provedena na konci svaření celého kotle. Povrchové úpravy dělané na konci výrobního procesu se dají jen velmi těžko zautomatizovat, a proto nelze aplikovat povrchovou úpravu náparem. Jiné technologie mohou být žárový nástřik obloukem, plamenem či plazmatem. Trubky membránové stěny mohou mít různé průměry. Při výpočetním návrhu kotle je tento parametr zvolen konstruktérem. Většinou se průměry pohybují od 30 do 70 mm. Mezera mezi trubkami je vyplněna plochou tyčí, kterou také volí konstruktér, tudíž je veliké množství variant. Dohromady jsou trubky a tyče střídavě spojeny koutovým svařem. Všechny tyto kroky jsou přísně kontrolovány a je snahou dělat vše strojně pro minimalizaci vad. Materiály trubek jsou také v různých



Obr. 2 Model kotle s membránovými stěnami [9]



Obr. 3 Kotel s membránovými stěnami [9]



variantách. Volí se podle parametrů páry. Pro nižší teploty a tlaky jsou voleny vybrané oceli třídy 15 nebo 17. Protože je snaha dosahovat co nejvyšších účinností a nejnižších výstupních škodlivin do ovzduší, bylo by dobré, aby pára měla přes 700 °C a tlak okolo 35 MPa. Počítá se s tím, že takové vlastnosti už nevydrží žádná ocel dlouhodobě a bude nutné používat niklové slitiny. Ty jsou velice odolné proti korozi za vysokých teplot a také proti creepu, ale jsou velice drahé.

Bloky membránových stěn mohou být vyráběny v mnoha variantách, podle přání zákazníka. Vyrábějí se buď přímé nebo ohýbané. Mohou mít délku okolo 7 metrů a šířku přibližně 1 metr. Po svaření jsou všechny svary kontrolovány rentgenem. Pro svaření mohou být použity například metody TIG, MIG/MAG nebo SAW. Pro snížení emisí odcházejících z elektrárny je vytvářena redukční atmosféra. Kvůli snížení kyslíku v atmosféře kotle nejsou vytvářeny povrchové oxidy na stěnách kotle tak, jak by měli. Tyto oxidy jsou většinou mnohem stabilnější než samotný kov a chrání materiál před korozi, například chrom je na korozi náchylnější než železo, ale velice stabilní oxid chromu vytváří tenký povlak na povrchu součásti, ta je poté chráněna před další oxidací. Pro zvýšení ochrany, a tedy i životnosti je možné použít na povrch návar nebo žárový nástřik z materiálů, které jsou více odolné proti mechanismům opotřebení, jedná se především o nástřik chromem nebo návary austenitickými materiály na bázi niklu. Při navařování dochází k tepelnému ovlivnění a promísení se základním materiálem. Je důležité navrhnout postup navařování tak, aby promísení bylo co nejnižší a základní materiál byl co nejméně tepelně ovlivněn, ale aby došlo ke kvalitnímu spojení. Proto je zapotřebí zvolit co nejvhodnější svařovací parametry a postup kladení jednotlivých housenek. Ukázka navařování membránové stěny je na obrázku 4.

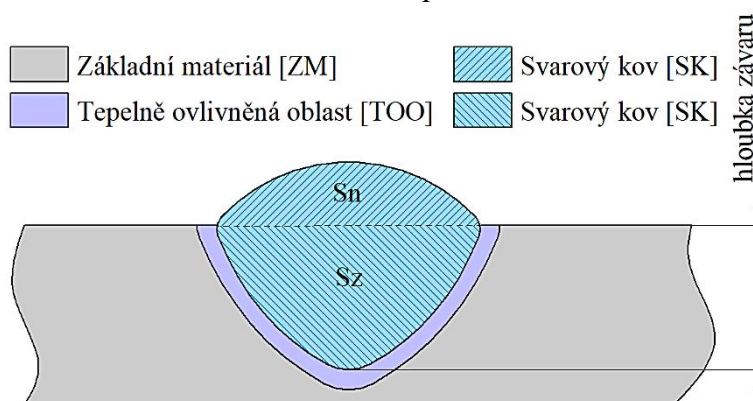


Obr. 4 Navařování membránové stěny [10]

## 2 SVAŘOVÁNÍ A NAVAŘOVÁNÍ [11] [12] [13]

Svařování znamená spojování součástí způsobem, kterým po vyhotovení nelze jednotlivé díly rozebrat bez narušení svaru a jeho okolí. Spojovat můžeme dvě a více součástí s přídavným nebo bez přídavného materiálu. Pro uskutečnění je nutné aktivovat plochy pomocí tepelné, tlakové nebo radiační energie. Tyto energie nataví nebo zplastizují povrch a umožní přiblížení povrchů na vzdálenost působení meziatomových sil a vzniku kovových vazeb. Teoreticky by tato energie mohla být velice malá v případě vytvoření dostatečně rovinných ploch. Když by se tyto plochy přitlačily k sobě a vzdálenost mezi nimi by byla přibližně  $5 \cdot 10^{-8}$  cm na všech místech, došlo by ke spojení. V reálném případě lidé nemají technologii pro vytvoření takovéto plochy a přiblíží se k sobě pouze výstupky povrchů, které tvoří pouze nepatrnou část celkové plochy a zároveň zde existují nečistoty, které taktéž spojení brání.

Navarování není určeno pro spojování součástí, ale slouží pro přidání objemu kovu nebo pro zvýšení ochrany povrchu před chemickým nebo mechanickým poškozením. U navařování musí dojít k určitému promísení s navařovaným materiálem jinak by vznikl ostrý přechod a jednalo by se o proces pájení nebo povlakování. Při navařování bývá důležité mít zředění co nejnižší, protože může docházet ke znehodnocení požadovaných vlastností návarové vrstvy, především při použití výrazně odlišného chemického složení přídavného a základního materiálu. Na obrázku 5 je průřez návarem a v něm zaznamenány základní pojmy a plochy průřezu pro výpočet zředění. Při navařování dochází vlivem tepla k ovlivnění základního materiálu. To bývá nejslabší místo, protože zde došlo k určitým strukturním přeměnám a není zde už žádné promísení kterým by se mohlo legovat pro zlepšení plastických vlastností. Hodnoty zředění jsou závislé především na technologii navařování. Zředění lze vypočítat podle vztahu:



Obr. 5 Ukázka návaru pro výpočet zředění [11]

$$Z_{sk} = \frac{Sz}{Sn + Sz} \cdot 100 [\%] \quad (2.1)$$

kde: Sz - plocha závaru [mm<sup>2</sup>],

Sn - plocha navařeného kovu [mm<sup>2</sup>].

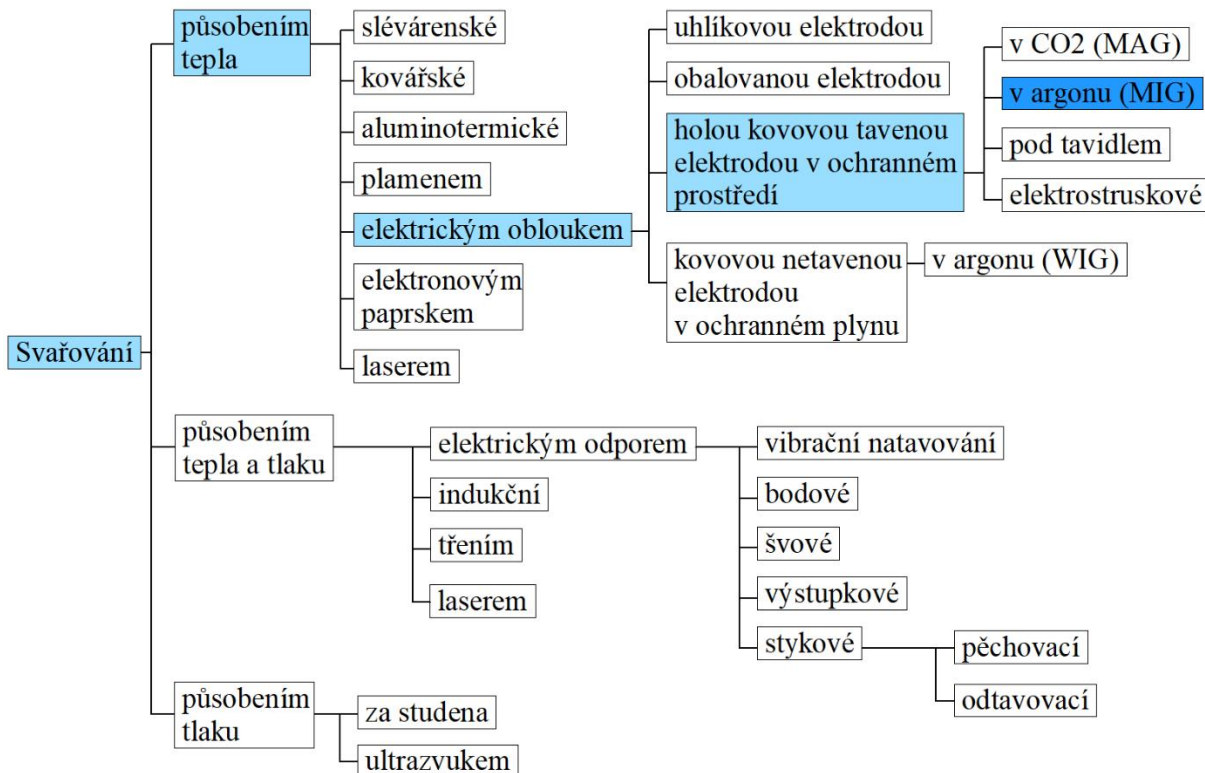
Velikou oblastí pro navařování je renovace. Jedná se především o nástroje. Rozhodujícím faktorem pro opravu navařováním je samozřejmě cena. Renovují se především střižné nástroje, tažné nástroje, formy pro vstřikování plastů atd. Téměř vždy se nástroj opotřebí pouze na několika funkčních místech jako jsou střižné plochy, hrany nebo různá zaoblení. Všechny tyto části se navařují. Většinou se pro opravy používají technologie, které nezpůsobují takřka žádnou tepelně ovlivněnou oblast. Příkladem je navařování mikroplazmou nebo mikrotigem. U větších poškození se používá navařování výplňové vrstvy houževnatým materiálem a teprve poté je aplikován krycí návar z kovu, který má vysokou pevnost a schopnost odolávat abrazi. Tuto schopnost zaručuje tvrdost materiálu, která u návarů může být daleko vyšší, z důvodů přítomnosti legujících prvků, které jsou drahé a nebylo by možné je použít při technologiích výroby forem. Výsledný stav musí být samozřejmě obroben, což kvůli vysoké tvrdosti není snadné.

## 2.1 Rozdělení metod svařování [11] [13] [14]

Metody svařování je možno rozdělit podle toho, jestli jsou tlakové nebo tepelné případně jejich kombinací. S rostoucím tlakem je možné snížit teploty, avšak pouze v určité mezi, protože poté už nejsme schopni zaručit spolehlivost konstrukce. Existují však některé metody, kde se používá pouze tlaku a svar kvalitní je. Příkladem je svařování tlakem za studena nebo svařování ultrazvukem. To jsou metody, které nejsou vhodné pro pevné materiály, ale spíše pro plasty, mosaz, měď nebo svařování drátů, které mají malou plochu průřezu, a tudíž není zapotřebí velkých sil pro vyvolání tlaků a způsobení plastické deformace. Rozdělení spadá pod normu ČSN EN ISO 4063 (ekvivalentní s ČSN ISO 857). Tato norma udává označování jednotlivých metod a jejich rozdělení. Na obrázku 6 jsou tyto metody znázorněny. Norma je mnohem podrobnější a bere v potaz všechny metody svařování, které rozděluje do 7 základních skupin:

- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| a) Obloukové svařování       | začínající č. (1)  |
| b) Odporové svařování        | začínající č. (2)  |
| c) Plamenové svařování       | začínající č. (3)  |
| d) Tlakové svařování         | začínající č. (4)  |
| e) Elektronové svařování     | začínající č. (51) |
| f) Laserové svařování        | začínající č. (52) |
| g) Ostatní způsoby svařování | začínající č. (7)  |
| h) Pájení                    | začínající č. (9)  |

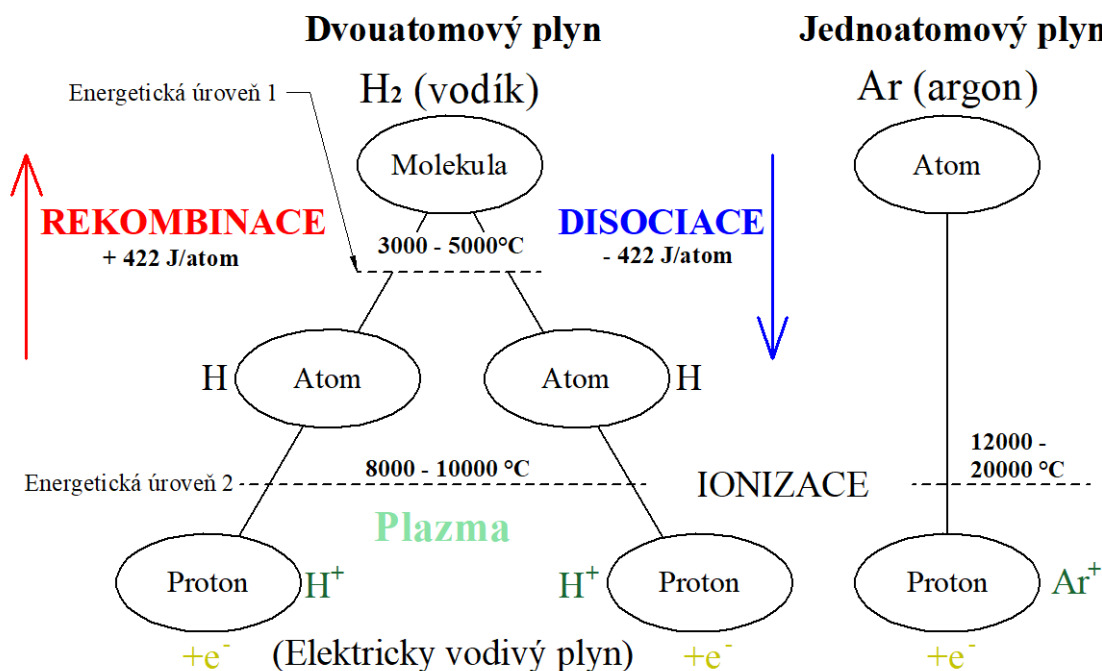
Konkrétní metody mají číslo maximálně třímístné, to označí metodu i s informací jedná-li se o svařování s přídavným materiálem nebo bez něj.



Obr. 6 Rozdělení metod svařování [12]

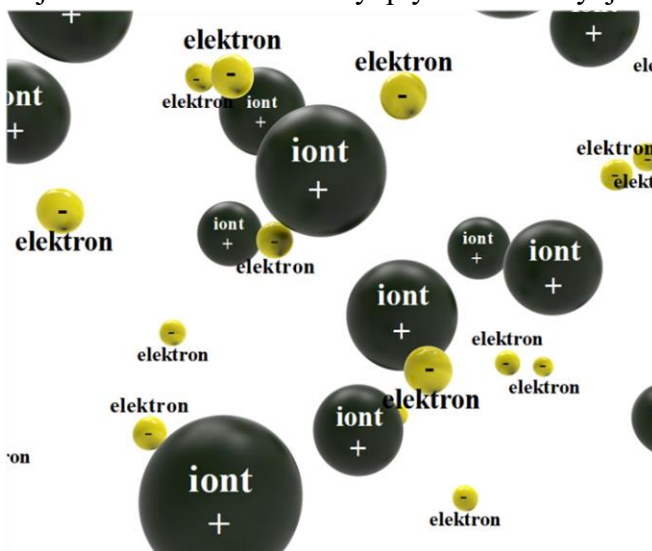
## 2.2 Teorie obloukových metod [11] [13] [15] [16]

Oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Je to nízkonapěťový elektrický výboj, který prochází vysoce ionizovaným plynem. Plynů může být mnoho druhů, podle metody svařování. V zásadě se jedná o jednoatomové nebo dvouatomové plyny. Pro zajištění vodivosti plynů je důležité uvolnit z atomů volné elektrony. To je vidět na obrázku 7, kde je dvouatomový vodík při přidání energie ve formě elektrického napětí a teploty disociován a rozdělen na dva atomy. Z atomů je uvolněn elektron a plyn se tím stává vodivým. U jednoatomových plynů probíhá rovnou ionizace.



Obr. 7 Princip disociace a ionizace [13]

U klasických svařovacích metod je rozmezí napětí (U) od 10 do 50 V a proud (I) v rozmezí 10 až 2000 A. Obrázek 8 přibližuje reálnější náhled na ionizovaný plyn. Elektrony jsou přitahovány k plusovému pólu a ionty k zápornému pólu. Hoření doprovází světelné záření o veliké intenzitě a také vyzařování UV záření. To je lidem velice nebezpečné, proto je nutné při svařování nosit ochranné pomůcky na zakrytí kůže, a především kuklu pro ochranu očí. Zapojení je závislé na svařovaném materiálu a na metodě svařování. To platí u stejnosměrného i střídavého proudu. Rozdíl je v tom, že u střídavého zapojení proudu dochází k otáčení kladných a záporných pólů. V běžné elektrické síti je frekvence otáčení 50 Hz. Nejběžnější zapojení je takové, že záporný pól je na elektrodě a kladný na základním materiálu. Protože elektroda je takřka vždy malého průměru, je v této oblasti vysoká proudová hustota. Elektrický oblouk má několik

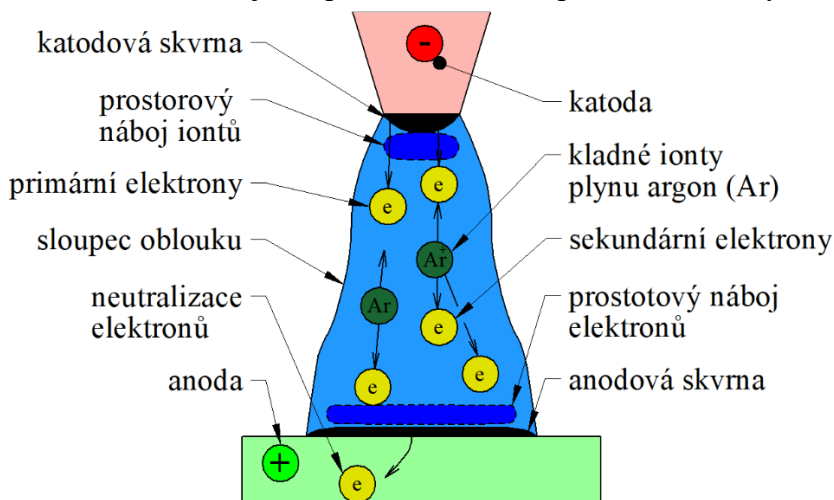


Obr. 8 Ukázka ionizovaného plynu [13]



hlavních částí, které jsou znázorněny na obrázku 9. Na tomto obrázku je wolframová elektroda na záporném pólu a základní materiál je na kladném.

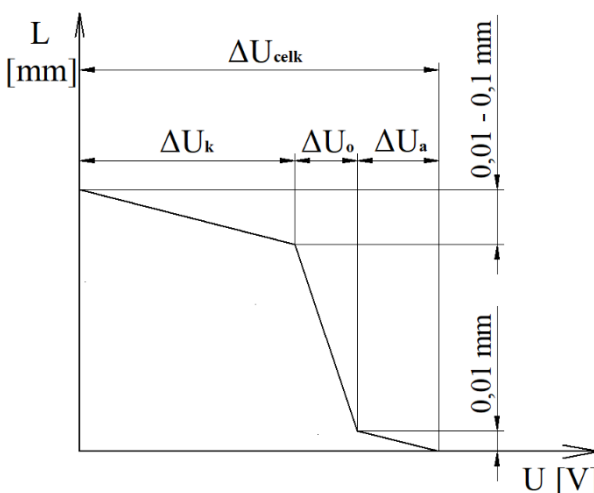
Na konci elektrody je katodová skvrna, která je na počátku ohřívána proudem. Při zvýšení teploty začne emitovat prvotní elektrony, ty jsou urychleny napětím na takovou rychlost, že při srážce s atomem argonu ho dokážou ionizovat na iont a další (sekundární) elektron. Protože ionty směřují ke katodě, je před katodovou skvrnou prostor s úbytkem napětí, to brzdí elektrony emitované z této skvrny. Kladné ionty v elektrodě předají svou energii ve formě tepla a zneutralizují se. Tento efekt je i na straně anody, kam směřují elektrony, které taktéž předají energii ve formě tepla a posléze jsou neutralizovány v základním materiálu.



Obr. 9 Hlavní části oblouku [11]

Sloupec oblouku je oblast, ve které dochází k disociaci a ionizaci plynů. Tento stav hmoty je nazýván plazmou. V této části jsou vysoké teploty, ty jsou závislé především na použitém plynu a stupni disociace a ionizace. Při překročení určité hodnoty proudu dojde k usměrnění částic iontu a elektronů pouze směrem k základnímu materiálu vlivem elektromagnetických sil vytvořených proudem. Maximální teplota je těsně pod katodovou skvrnou v ose oblouku a se vzdáleností od osy výrazně klesá, stejně tak osovou vzdáleností od katody, to však mnohem pozvolněji. Maximální teplota v oblouku může dosahovat až 16000 °C. Pro každou metodu je tato teplota rozdílná. Pro metodu MIG/MAG je teplota v oblouku 8000 až 15000 °C.

U základního materiálu se nachází anodová skvrna. Na ní dopadají elektrony, které mají vysokou kinetickou energii. Nárazem tuto energii přeměňují na teplo a na záření. Některé odpařující se atomy kovu z této oblasti jsou ionizovány a podporují stabilitu oblouku. Vlivem vysoké koncentrace elektronů nad anodovou skvrnou dochází ke vzniku oblasti, která je nazývána prostorový náboj elektronů. V tomto místě nastává úbytek napětí 1 až 3 V. To je mnohem méně než u katodové skvrny, kvůli tloušťce této oblasti. Úbytky napětí jsou znázorněny na obrázku 10.  $\Delta U_k$  je úbytek napětí na katodě, která může mít tloušťku od 0,1 až 0,01 mm.  $\Delta U_o$  je úbytek napětí na oblouku, přičemž oblouk může mít různou vzdálenost od základního materiálu, podle metody svařování a podle použitých parametrů. Obecně je na jednom milimetru oblouku úbytek napětí přibližně dva volty.  $\Delta U_a$  značí úbytek napětí na anodě a  $\Delta U_{celk}$  je celkové, které je u některých svařovacích zařízení přímo po ukončení svaru zobrazeno na displeji, nebo ho lze dopočítat pomocí empirických vztahů, ty jsou však velice nepřesné.



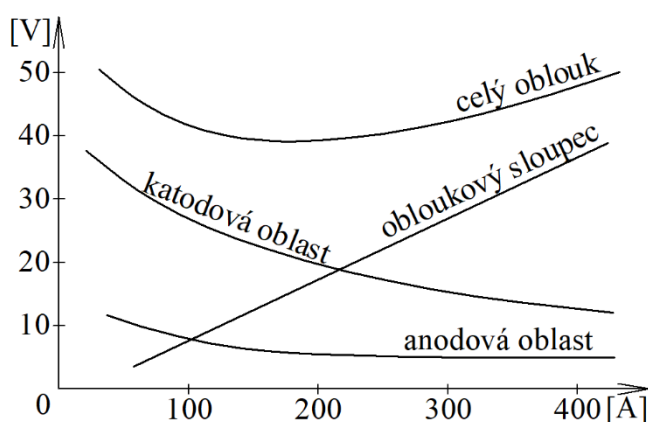
Obr. 10 Rozložení napětí v oblouku [15]

Oblouk je možné zapálit třemi způsoby. Dva se používají výhradně pro metodu TIG nebo plazmu. Jedna metoda je zapálení oblouku vysokonapěťovým vysokofrekvenčním ionizátorem při druhé metodě je elektroda v kontaktu se základním materiálem a zapaluje se startovacím proudem, který je malý a ohřívá pouze hrot elektrody při ohřátí na potřebnou teplotu se okolní atmosféra začne ionizovat a zároveň se elektroda začne oddalovat společně s postupně narůstajícím proudem na svařovací úroveň. V tomto průběhu vznikne oblouk. U plazmy existuje ještě jeden způsob, a to zapalování oblouku uvnitř plazmové hlavy a poté přiblížení ke svařovanému nebo řezanému materiálu. Je zde pojistka, která po určitém čase kdy není elektroda přiblížena k základnímu materiálu, vypne zařízení.

Pro ostatní obloukové svařování je používána metoda, kde elektroda přijde přímo do kontaktu se základním materiálem při nastavených svařovacích parametrech. Vznikne ohmické teplo a po krátkém čase je okolní atmosféra ionizována a vzniká oblouk.

Oblouk má svoji voltampérovou charakteristiku. To je průběh proudu v závislosti na napětí.

Každá část oblouku (katodová skvrna, anodová skvrna a sloupec oblouku) má svoji závislost, kterou když sečteme, dostáváme výslednou voltampérovou charakteristiku oblouku (obr. 11). Bohužel tato charakteristika je závislá na mnoha faktorech jako je například délka oblouku, chemické složení základního materiálu, průměr a materiál elektrody, použitý plyn a metoda svařování. Z těchto důvodů je patrné, že tuto charakteristiku není snadné zjistit. Často je používána zjednodušená charakteristika, která má lineární závislost danou vztahem:



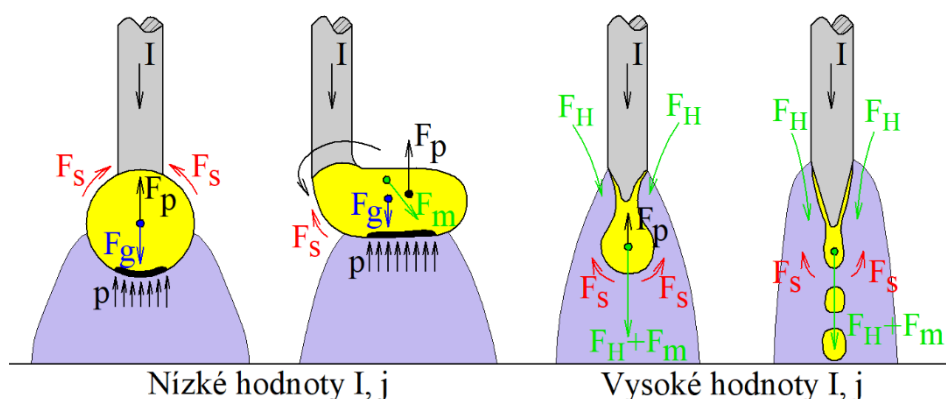
Obr. 11 VA charakteristika oblouku [11]

$$U = 20 + 0,04 I \quad (2.2)$$

Kde:  $I$  je proud [A].

Při metodách, kde je přídavným materiálem samotná elektroda dochází k jejímu natavování ve formě kapiček. Na tyto kapičky působí síly, které jsou ukázány na obrázku 12. Při malé proudové hustotě a malém napětí je výrazná síla povrchového napětí a kapičky jsou veliké. Při vysokých hodnotách těchto parametrů jsou největší síly hydrodynamická a elektromagnetická.

$F_s$  - síla povrchového napětí  $F_p$  - síla vyvolaná tlakem kovových par  
 $F_g$  - gravitační síla  $F_H$  - hydrodynamická síla  $F_m$  - elektromagnetická síla

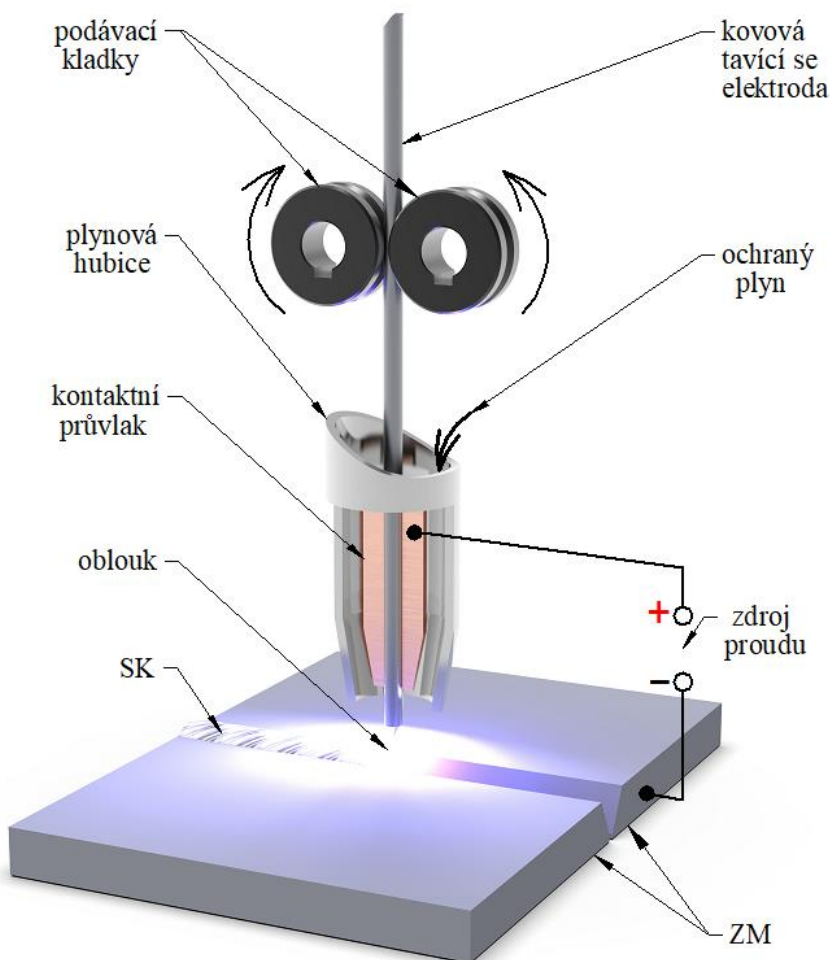


Obr. 12 Síly působící na kapku tavicí se elektrody [11]



## 2.3 Technologie MIG/MAG [11] [13] [17]

Jedná se o obloukové svařování elektrickým proudem, při kterém vzniká lokální ohřev. U této technologie je elektroda používána jako přídavný materiál a je odtavována. Kvůli malým průměrům elektrody je proudová hustota nejvyšší ze všech obloukových metod. Při metodě MIG je používán inertní plyn. Většinou je používán argon nebo hélium. U metody MAG jde o plyn aktivní, to znamená, že při svařování reaguje s ostatními prvky. Většinou se jedná o plyn  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  nebo směsi s argonem. Jakmile je ve směsi nějaký jiný plyn, než inertní jedná se už o metodu MAG. Tyto plyny přispívají ke zvýšení teploty během procesu svařování. Tento druh svařování je uplatněn především pro svařování ocelí. Pro neželezné kovy je většinou volena metoda MIG, důvodem bývá vysoká afinita ke kyslíku. Na obrázku 13 je princip procesu svařování touto metodou. Podávací kladky jsou synchronizovány, aby

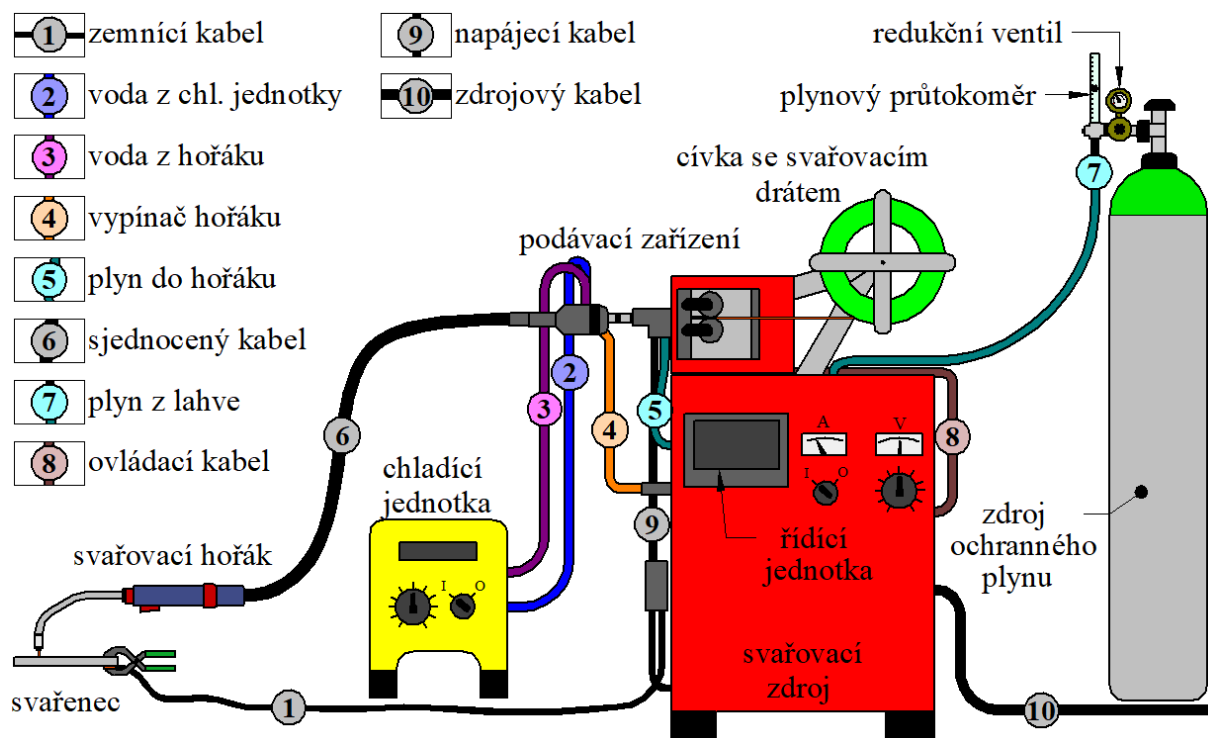


Obr. 13 Princip svařování MIG/MAG [17]

nedošlo k prokluzu a zároveň je na nich nastavitelný přítlak, kvůli možné deformaci. Tavicí se elektroda je ve formě drátu navinuta na cívku nebo existuje velké balení pro robotizované pracoviště. Drát je posouván pomocí kladek do místa svařování. Jeho průměry jsou v rozmezí 0,6 až 1,6 mm. Když prochází kontaktním průvlakem, který je vyroben z mědi, je kontaktem s tímto dílem propojen se zdrojem elektrického stejnosměrného proudu. Pro plný drát je zapojen vždy na kladném pólu a pro modifikaci této metody MOG nebo FCAW, kde je drát trubičkový, je kontaktní průvlak zapojen na pól záporný. Druhý pól musí být připevněn k základnímu materiálu přímo nebo skrze vodivý stůl či přípravek nepřímo. Plynová hubice usměrňuje proud ochranného plynu, aby byl přiváděn ke svarové lázni pro její ochranu. U této metody není vytvářena struska, tudíž je plyn nutný pro ochranu svarového kovu do doby, než se sníží jeho teplota. Kvůli absenci strusky je možnost vizuálně nalézt některé defekty. Touto metodou lze svařovat materiály od tloušťky 0,8 mm. Přenos kapiček elektrody do svarové lázně je závislý na svařovacích parametrech. Při nízké proudové zátěži je přenos zkratový. Se zvyšujícím se proudem je přenos přeměněn na sprchový a dále na rotující oblouk. Touto metodou lze svařovat ve všech polohách. Zařízení pro MIG/MAG jsou kvůli rozměrům a váze vhodná především pro dílenské nebo robotické pracoviště. Pro práci v terénu je většinou používána metoda 111.

### 2.3.1 Zařízení pro svařování metodou MIG/MAG [11] [17] [18]

Zařízení na svařování je složeno z několika základních částí, které jsou zobrazeny na obrázku 14. jednotlivá zařízení jsou popsána textem a spojovací kabely nebo hadice jsou označeny čísly. Všechny až na zemnicí a zdrojový kabel jsou přivedeny do jednoho kabelu, který vede ke svařovacímu hořáku. Chladicí jednotka nemusí být vůbec zapojena do systému. Obecně je považována za užitečnou teprve od dlouhodobé proudové zátěže nad 150 A. Celková sestava má několik modifikací, pro různé možnosti aplikace. První je klasická se standardním hořákem. Druhá je varianta se systémem push-pull, kde je speciální hořák s elektrickým podavačem. Protože první podavač drát tlačí a druhý podavač ho táhne je musí být zajištěno sjednocení podávání. Díky této technologii je možné prodloužit kabel až na 10 m nebo je významný pro měkké přídavné materiály jako je například hliník. Další dvě uspořádání jsou vhodná pro svařování velkých dílů nebo tam, kde je dobré mít dlouhý kabel, aby nebylo nutné posouvat celým zařízením. Jde o umístění mezipohonu na sjednocený kabel k hořáku nebo umístění celého podavače drátu zvlášť na malém vozíku. Další možností je umístění podavače na rameno, svářeč má poté lepší manipulační prostor. Další modifikací je zautomatizování procesu a umístění na robotické zařízení.

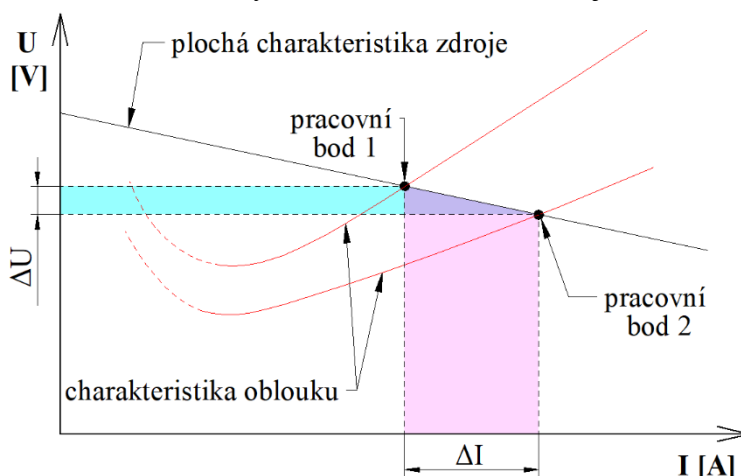


Obr. 14 Zařízení pro svařování MIG/MAG [17] [19]

- Svařovací zdroje

Jako zdroj je použit usměrňovač nebo invertor, protože tato metoda využívá vždy proud stejnosměrný. Každý svařovací zdroj má svoji voltampérovou charakteristiku, danou svojí konstrukcí. Existují také univerzální zařízení pro svařování obloukovými metodami, které jsou schopné tuto charakteristiku měnit a tím je rozšířeno použití pro metodu MMA, MIG/MAG nebo TIG. Tyto zařízení jsou však o mnoho dražší a v praxi jsou většinou stejně použity jen pro jednu z metod i přes to, že přestavení není tolik náročné. Metoda MIG/MAG používá plochou charakteristiku, která umožňuje efektivně stabilizovat délku oblouku. Princip je takový, že při ploché charakteristice stačí malá změna napětí a způsobí velikou změnu proudu. Protože napětí úzce souvisí se vzdáleností elektrody od svařovaného

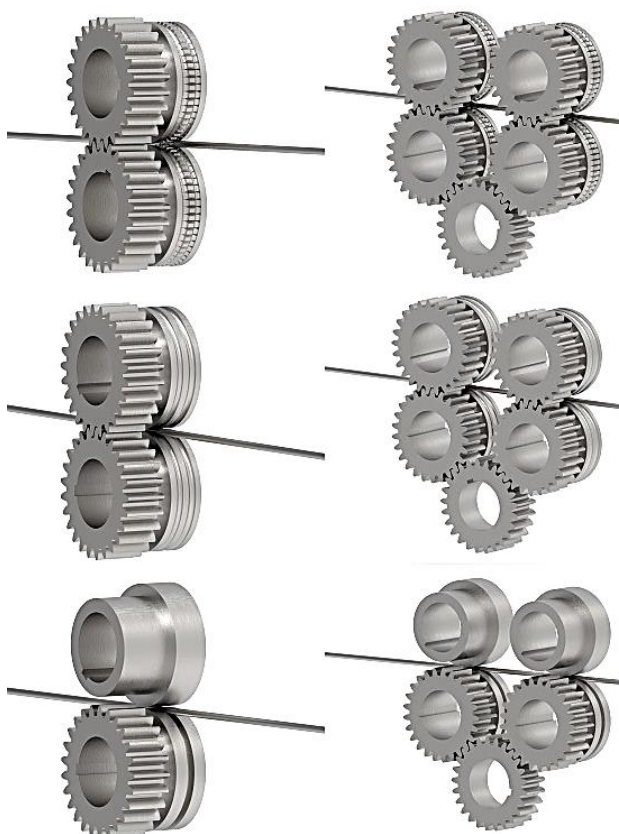
materiálu, lze považovat změnu vzdálenosti elektrody od základního materiálu jako iniciaci pro změnu napětí. Obrázek 15 zachycuje právě plochou voltampérovou charakteristiku zdroje a charakteristiku oblouku. Průsečík těchto křivek je nazýván pracovní bod. Při zvětšení napětí je proud snížen a naopak. To je zásadní pro regulaci, protože právě proud je parametr, který ovlivňuje proces odtavování elektrody. Při vysokém proudu je elektroda odtavována více. To zaručuje při konstantní rychlosti podávání drátu samovyrovňování délky oblouku. Plochá charakteristika může být rostoucí nebo klesající, princip je však stejný.



Obr. 15 Plochá charakteristika svařovacího zdroje [17]

- Podávací zařízení

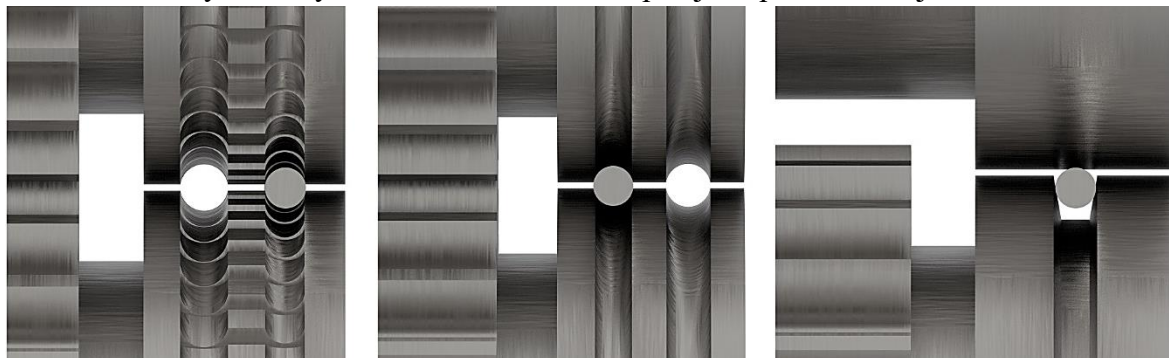
Toto zařízení je v drtivé většině případu umístěno uvnitř nebo na svařovacím zařízení. Svařovací drát je navinutý na cívce. Ta váží až 15 kg a rychlost podávání drátu může být až 22 metrů za minutu, což znamená že je dosahováno značné hybnosti. Aby vše fungovalo je nutné umístit svařovací cívku na brzdu, která spolehlivě zabrzdí drát při vypnutí posuvu. To však znamená, že podávající kladky musí tuto brzdou přemáhat a zároveň tlačit drát do hořáku skrze bowden což klade také určitý odpor. Rotační pohyb zajišťuje elektrický motor. Rychlost podávání drátu je jeden ze základních nastavovaných parametrů při svařování. Tento parametr je řízen potenciometrem. Kladky jsou připevněny na mechanismu, kterým je možné měnit přítlak. Ten nesmí být příliš veliký, aby nedeformoval drát, ale ani příliš malý, aby nemohlo docházet k prokluzu. Je vyráběno několik různých provedení. Na obrázku 16 jsou tyto provedení ukázána jde o dvou a čtyř kladkové provedení.



Obr. 16 Dvoukladkové a čtyřkladkové podávací zařízení [11] [18]

U kvalitních svařovacích zařízení je používána právě tato varianta. Další možnosti provedení jsou úpravy tvarových drážek, které jsou znázorněny na obrázku 17. Jde o drážky lichoběžníkové, polokulaté hladké nebo drážkované. Buď jsou vyráběny jako hnaná a hnací kladka, nebo jsou obě hnací. Drážky, jsou vyráběny pro určité rozmezí průměrů. Hodně často jsou

vyráběny dvě drážky vedle sebe pro nejčastěji používané průměry. Obě kladky nemusí být stejné, druhá může být v některých případech pouze hladká. Každá drážka je vhodná pro určitý typ materiálu. Lichoběžníková je vhodná pro plné dráty z nízko, středně i vysokolegované oceli. Půlkruhová drážkovaná je vhodná pro trubičkové dráty a hladká pro měkké materiály. Kladky není vhodné mazat, naopak je doporučováno je odmastit.

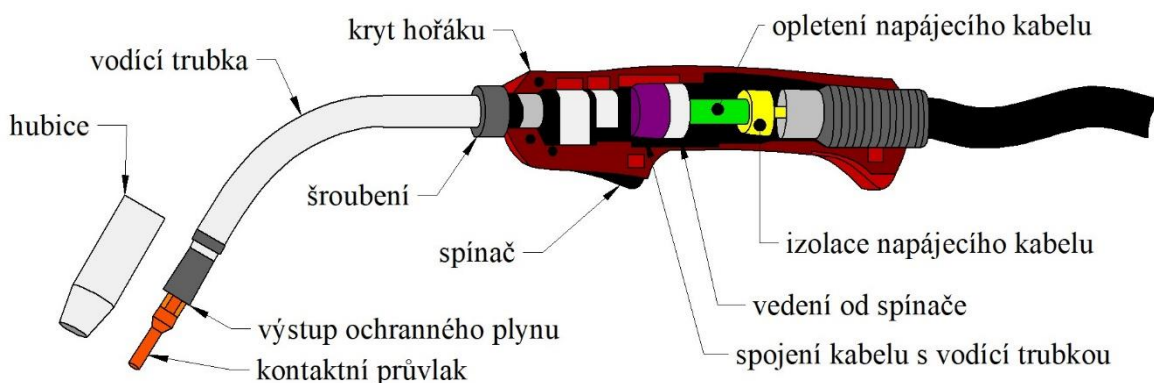


Obr. 17 Detail tvaru drážek podávacího mechanismu [18]

- Svařovací hořák

Hořák je koncová část, do které je přivedena elektronika, chladicí médium, elektroda ve formě drátu a plyn. přídavný materiál je veden v bowdenu, pro snadnější posuv. Elektronika je napájecí kabel a dva kabely pro ovládání. Chladicí hadice jsou jen v zařízeních nad 150 A. Jejich obsahem je destilovaná voda, která proudí do hořáku studená a z něj ohřátá zpět do chladicí jednotky, která je buď samostatná nebo integrovaná uvnitř celého zařízení. Hubice slouží pro usměrnění proudění plynu do svaru. Pokud zařízení nemá vodní chlazení, potom právě plyn slouží zároveň jako chladicí médium.

Svařovací hořáky rozdělujeme na ruční a strojní. Strojní má válcovou část, která je upínána do robota a ruční ergonomický úchyt. Ruční jsou buď standartní nebo se systémem push-pull. Na obrázku 18 je schéma klasického provedení svařovacího hořáku. Z hlediska ovládání jsou vytvořeny dva režimy. Dvoutaktní a čtyřtaktní. Dvoutaktní znamená, že při zmáčknutí spínače je zahájen předfuk plynu a po malé chvilce, která je nastavitelná se začne posouvat drát. Při puštění spínače dojde k zastavení posuvu drátu a následuje dofuk plynu, jehož načasování je také nastavitelné. Moderní svařovací zařízení mají k tomu na konci svařovacího cyklu nastavené vyplňování koncového kráteru. Čtyřtaktní režim funguje tak, že je všechno samostatně. Při stisknutí spínače je zahájen předfuk, po puštění je posouván drát. Při druhém stisknutí je posuv zastaven a při puštění je zastaven i dofuk.

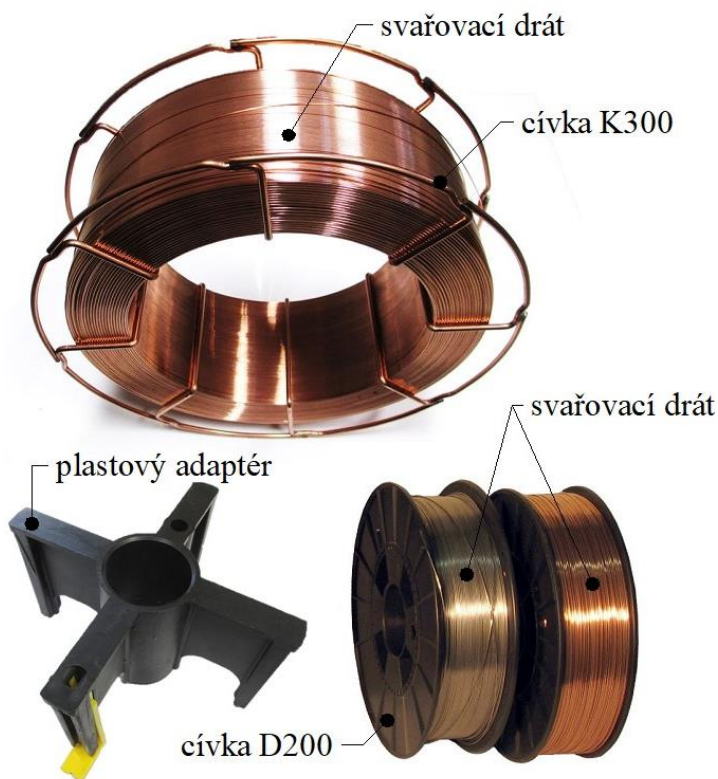


Obr. 18 Schéma svařovacího hořáku [17]

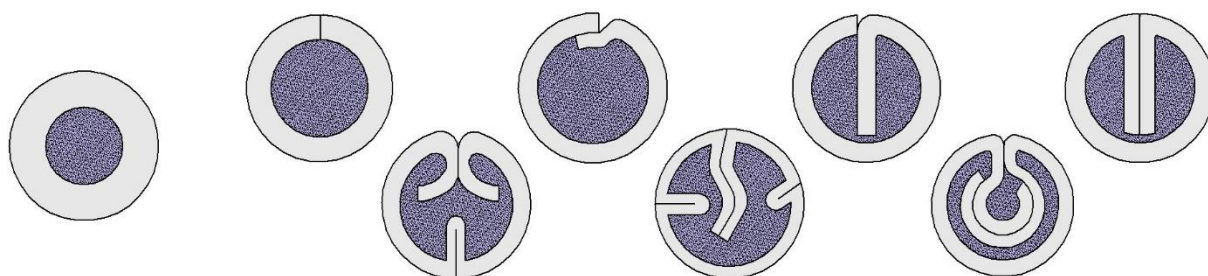


### 2.3.2 Přídavné materiály [11] [13] [17] [20]

Přídavné materiály jsou ve formě plných drátů nebo trubiček. Přídavný materiál je doporučen podobného chemického složení jako základní materiál, to je ale velice obecné a platí to převážně pro konstrukční oceli. Existuje mnoho různých použití, kde je možnost jiná. Volby přídavných materiálů u korozivzdorných ocelí jsou voleny podle požadované struktury ve svarovém kovu. Většinou je používán Schaefflerův diagram. Další aplikací mohou být výplňové vrstvy nebo návary pro určité aplikace. Materiály drátů jsou pro středně i vysokolegované a uhlíkové oceli, pro slitiny na bázi hliníku, mědi nebo niklu, případně slouží jako návarové materiály. Průměry drátů jsou normalizovaných rozměrů (0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,4). Pro robotizované pracoviště jsou navinuty ve velkém sudu, který může vážit až 475 kg. Pro ruční svařování je používána cívka, na které je drát navinut. Cívek je vyráběno několik druhů, ale ty nejzákladnější jsou D200, D300 a K300. Cívky typu D jsou vyráběny z plastu. Číselné označení udává jejich vnější průměr v milimetrech. Menší průměr je používán buď u menších svařovacích zařízení nebo je pro velice drahé přídavné materiály, vejde se na něj zhruba 5 kg ocelového přídavného materiálu. Varianta typu K je cívka kovová o průměru 300, která může být i poplastovaná. Její vnitřní průměr je větší, než je průměr brzdy, na kterou se cívky nasazují, tudíž je nutné použít plastový mezikus, jehož vnitřní průměr je požadovaných 50 mm. Někteří výrobci vyrábějí cívku o vnějším průměru 300 mm s již hotovou redukcí. Cívka typu D o velikosti 300 milimetrů má vnitřní průměr vždy 53 mm. Cívky včetně mezikusu jsou na obrázku 19. Trubičkové dráty jsou bezešvé nebo tvarově uzavřené. Jejich náplň může být bazická, rutilová, kovová nebo náplň pro vytvoření plyné svařovací atmosféry. Některé průměry se mohou lišit od plných drátů. Obrázek 20 ukazuje možné profily tvarově uzavřených elektrod. U plněných elektrod je většinou obal tvořen z uhlíkové oceli pro zajištění elektrické vodivosti.



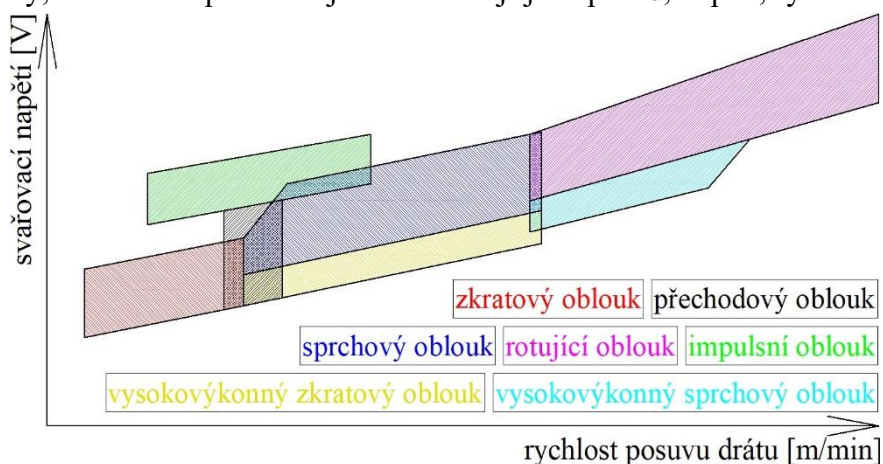
Obr. 20 Ukázka cívek [21]



Obr. 19 Bezešvá a tvarové profily elektrod [13]

### 2.3.3 Způsoby přenosu kovu [11] [17] [22] [23] [24] [25]

Přenos kovu do svarové lázně je velice důležitý proces, protože ovlivňuje geometrii a vlastnosti svaru. Parametry, které tento přenos nejvíce ovlivňují jsou proud, napětí, rychlost podávání drátu, průměr drátu a druh ochranného plynu. Změnou těchto parametrů je možné docílit různých typů oblouku a přenosu kovu. V principu je možné rozdělit přenos kovu na zkratový, sprchový nebo rotující. Další rozdělení je podle rychlosti posuvu drátu, případně délky oblouku. Později bylo vyvinuto řízení



Obr. 21 Druhy přenosu kovu [11] [17]

změny proudu, které je nazýváno pulzní svařování. Tyto základní přenosy jsou znázorněny na obrázku 21. V dnešní době jsou svařovací zařízení, která pomocí elektroniky a senzorů ovlivňují i základní typy přenosu kovu do svarové lázně. Těchto nových typů je mnoho. V podstatě se jedná o řízení svařovacího proudu, polarity, frekvence pulzů nebo posouvání drátu v reálném čase. Byl vytvořen také synergický režim, který řídí na základě jednoho parametru ty ostatní, to výrazně zjednoduší nastavování. Největší pokroky posledních let jsou převážně v rychlosti počítačů, které řídí proces moderního svařování. Systém rozpozná zkrat a dokáže upravovat proud tak, aby byly oddělovány ideálně velké kapičky kovu a nedocházelo k rozstříku. Protože ty nejmodernější stroje mají i kamerový systém umístěný přímo v hořáku, dokážou používat svařovací drát jako senzor pro detekci polohy dílů nebo měřit tolerance a snaží se je úpravou svařovacích parametrů zlepšit. Při měření drát na povrchu součásti kmitá a při přiblížení k hraně ji rozpozná a oddálí se. Tím dokáže změřit potřebné rozměry a vyhodnotit korekce, tyto systémy jsou určeny už jen pro robotizované pracoviště.

- Zkratový oblouk

Při tomto typu přenosu dochází k předání kovu zkratem. To znamená, že drát se dotkne svarového kovu. Frekvence přenosu je výrazně závislá na proudu a napětí. Při malém proudu a vysokém napětí je frekvence v rámci jednotek kapek za sekundu a při snížení napětí je frekvence zvýšena řádově na stovky kapek. Rozsah parametrů je pro proud 60 až 180 A, napětí 14 až 22 V a výkon odtavování 1 až 3 kg za hodinu. Krátkým spojením dojde ke snížení elektrického odporu a nárůstu proudu. Tento proud drát oddělí a kapička přejde do svarového kovu. Zkratem zhasíná oblouk, ale při uvolnění kapky drátu dojde ke vzniku mezery mezi drátem a základním materiálem a oblouk se obnoví. Při vysokém nárůstu proudu dochází k rozstříku kovu. Napětí se mění tak, že při krátkém spojení materiálů klesá a při oddělení kapky a vzniku mezery zase roste. Firma Fronius má pro zkratové přenosy dvě upravené metody. Jedná se o metodu CMT a LSC. Firma EWM má pro zkratový přenos coldARC nebo rootARC. Upravené metody mají digitálně přizpůsobený proces svařování a řídí proud tak aby bylo



Obr. 22 Zkratový oblouk [26]

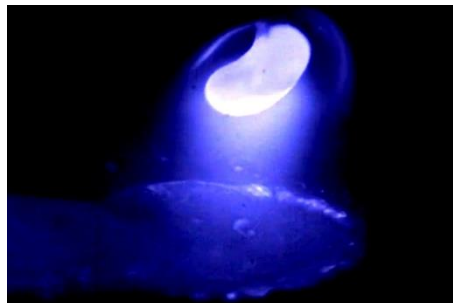
dosaženo malého tepelného ovlivnění a rozstříku kovu a také je zvýšena stabilita oblouku. Zkratový oblouk je na obrázku 22.

- Vysokovýkonný zkratový oblouk

Na obrázku 21 je vidět, že toto pásmo navazuje na zkratový oblouk a pokračuje směrem do větších posuvových rychlostí. Napětí zůstává obdobné, ale proud dosahuje až 200 A a výkony navařování jsou 3 až 10 kg za hodinu. Výlet drátu je mnohem delší než u předchozího typu, to ho odporovým teplem předeřívá a kvůli vysoké rychlosti podávání dochází ke zkratu. Velká vzdálenost hořáku od materiálu je podmíněna vyšším průtokem plynu, aby bylo místo svařování ochráněno. Plyn je vhodný Ar + 8 % CO<sub>2</sub> a jeho průtok se pohybuje od 20 do 30 litrů za minutu.

- Přechodový oblouk (kapkový)

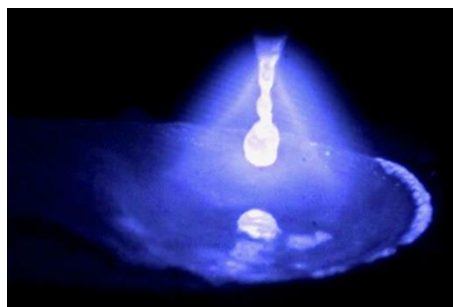
Parametry má tento typ mezi zkratovým a sprchovým přenosem. Napětí 22 až 28 V a proud 190 až 250 A. Protože elektroda je zatěžována vysokým proudem, dochází k natavení drátu do veliké kapky, její frekvence přenosu je okolo 5 až 40 kapek za sekundu. Reakční tlak par způsobuje vychylování kapek mimo osu. Rychlost uvolněných kapek je vysoká, to způsobuje rozstřík. Z těchto důvodů je snahou se tomuto přenosu vyhnout. Firma EWM používá metodu forceArc, která střídá přenos mezi zkratovým a sprchovým typem. Proces je řízený a nedochází k vyosování kapek a ani k rozstříku. Svar je v porovnání se zkratovým přenosem velice úzký a hluboký, což zaručuje průvar v kořeni. Přechodový oblouk je na obrázku 23.



Obr. 23 Kapkový oblouk [26]

- Sprchový oblouk

Jde o bezzkratový přenos kovu. Nelze uskutečnitelný v čistém CO<sub>2</sub> kvůli vysokému povrchovému napětí. Pro správný proces je vhodné mít ve směsi alespoň 80 % argonu. Argon je snadno ionizovatelný a konec drátu je obklopen malou částí plazmatu, tímto způsobem je tvořen značný ohřev a dochází k natavování do tvaru špičky. Proud je v rozsahu od 200 do 500 A, napětí je od 28 do 40 V a výkon navařování činí 3 až 12 kg za hodinu. Kapky kovu jsou velice malé a nezpůsobují rozstřík, jejich frekvence je až 350 Hz. Vzhledem k tomu, že oblouk nezhasíná, dochází k vysokému přenosu tepla, to tvoří velikou svarovou lázeň. Sprchový oblouk je vhodný pro velké tloušťky materiálu jako výplňová vrstva, ale převážně ve vodorovných polohách, jinak by veliká svarová lázeň tekla. Sprchový oblouk je na obrázku 24.



Obr. 24 Sprchový oblouk [26]

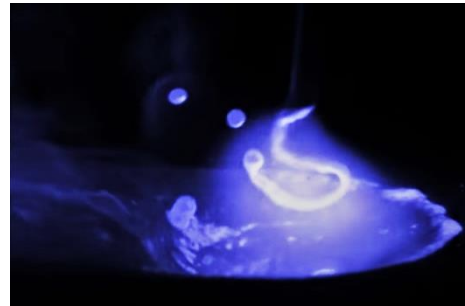
- Vysokovýkonný sprchový oblouk

Proud je v rozsahu 450 až 750 A, napětí 40 až 50 V. rychlost posuvu drátu je 20 až 45 metrů za minutu a výkon odtavování až 25 kg za hodinu. Plyn je používán Ar + 8 % CO<sub>2</sub> a průtok 18 až 25 litrů za minutu. Vlivem proudu jsou odtavované kapky kovu velké přibližně jako průměr elektrody a frekvence je vysoká. Svar je úzký s hlubokým průvarem.



- Rotující oblouk

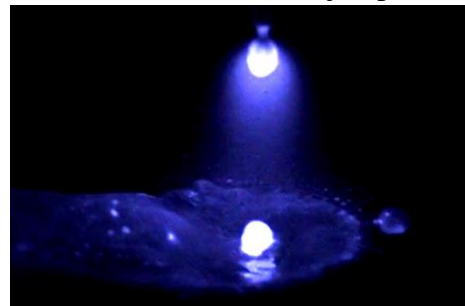
Proud a rychlost posuvu drátu je podobný jako u vysokovýkonného sprchového oblouku. Přenos je specifický vysokým napětím, které je až 65 V a delším výletem drátu (nad 20 mm). Drát je vysokým proudem odporově nahříván až k teplotě tavení a elektromagnetickým polem roztáčen. Svar může mít vzhledem k vysokým parametrům hluboký a široký závar, ale protože je snaha dosahovat co největších svařovacích rychlostí pro úsporu času, rotující oblouk není pro svařování příliš vhodný. Rotační pohyb je velice nestabilní a dochází k rozstříku. Tento přenos je možné využít pouze u automatizovaných systémů, což jeho použití snižuje, výhodný je pro velmi tlusté součásti. Rotující oblouk je na obrázku 25.



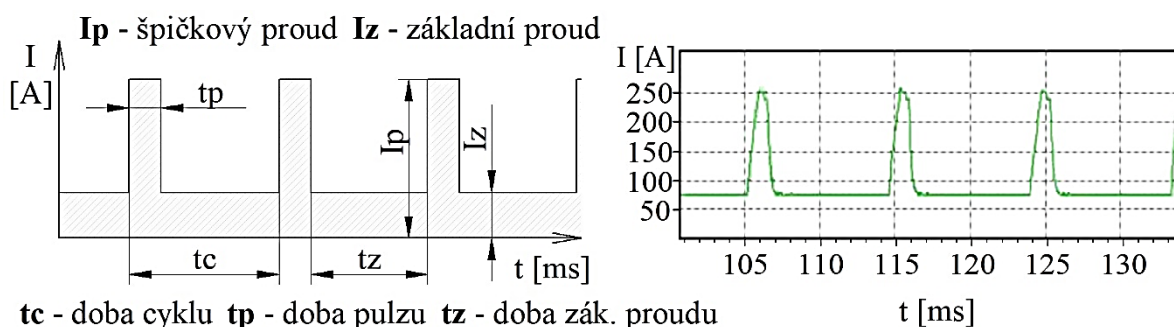
Obr. 25 Rotující oblouk [26]

- Impulsní oblouk

Tento typ je v oblasti od zkratového do sprchového přenosu a je specifický tím, že je elektronicky nastavený průběh proudu v čase. Cyklus je stále opakován o určité frekvenci. Doba cyklu je v podstatě perioda a lze ji snadno vypočítat jako převrácenou hodnotu frekvence. Tvar křivky je pravoúhlý, lichoběžníkový, oblý nebo je vytvořen tvar jiný, který zahrnuje materiály jako je například hliník, vysokolegovanou ocel a další, nebo je upraven pro určitou směs plynu. Proud má pomyslné dvě hladiny, jedna hladina je základní proud a druhá je proud na vytvoření a oddělení kapky. Protože se jedná o bezzkratový přenos, oblouk hoří po celou dobu a pro jeho udržení je nastaven právě základní proud o hodnotách okolo 40 A. Tento proud je postačující pro ionizaci prostředí. S rostoucím proudem roste kapka natavovaného drátu, když je proud pro tvoření a oddělování kapky malý, doba, než se kapka oddělí musí být velká, aby měla kapka dostatečnou velikost, z toho vyplývá, že frekvence je také malá. Naopak se stoupajícím proudem stoupá i frekvence pulzů. Průměrná hodnota proudu je nižší, než když by křivka byla konstantní, a proto je vnesené teplo do svaru také nižší. Šířka pulzu je v rozmezí od 0,2 do 0,5 ms. Výkon odtavování je v rozmezí 2 až 5 kg za hodinu. Protože je impulsní oblouk tolik výhodný, většina firem ho přidává do svých technologií přenosu kovu. Příkladem toho jsou společnosti Fronius nebo EWM. Firma Fronius má právě takto upraveny metody CMT puls, CMT advanced puls, PMC a firma EWM má rootArc puls, forceArc puls XQ, coldArc puls XQ nebo wiredarc puls XQ. Na obrázku 26 je impulsní oblouk a na obrázku 27 průběh proudu v čase.



Obr. 27 Impulsní oblouk [26]

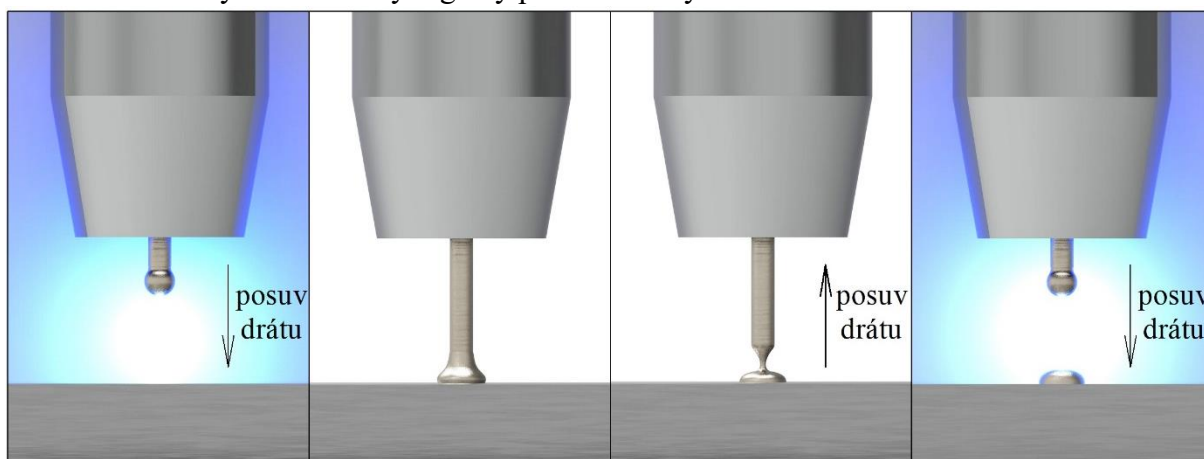


Obr. 26 Průběhy impulsního proudu [13] [18]



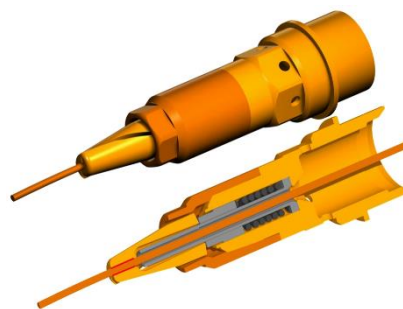
### 2.3.4 Metoda CMT a její modifikace [22] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33]

Tato metoda byla vyvinuta společností Fronius v roce 2005 pro robotické svařování a o rok později i pro ruční. Tato metoda využívá pohybu drátu střídavě vpřed i vzad. Tento mechanismus byl poprvé použit již v roce 1997, nejednalo se však o samotný proces svařování, ale pouze o bezroštíkové zapalování oblouku označované SFI. Na obrázku je 28 ukázán princip. V první části je zvýšen proud, to vytvoří oblouk a drát je posouván k základnímu materiálu. Při prvním kontaktu, dojde k vyslání signálu pro okamžité snížení proudu, který by jinak stejně jako při zkratovém přenosu stoupl na vysokou úroveň důsledkem snížením odporu, a to by způsobilo odtavení konce elektrody a zároveň rozstřík. Proud je snížen na velice nízkou hodnotu a při přilnutí kapky k povrchu je drát nastaveným časem táhnut zpět do hořáku a tím je kapka oddělena to ukazuje třetí část obrázku. Ihned po přerušení zkratu je proud zvýšen a kvůli malé vzdálenosti je hladce zapálen oblouk, který opět nataví konec elektrody a cyklus je opakován při frekvenci až 130 Hz. Původní CMT dosahovalo průměrné hodnoty pouze 70 Hz. Postupem času byla svařovací zařízení vybavena novým zdrojem a nyní je rychlost opakování až 130krát za vteřinu. Cyklus není závislý na předem definované závislosti proudu. Má nastavenou pouze jednu periodu, která se sepne po vyslání signálu při zkratu. Tento proces umožňuje výborně reagovat na změnu délky výletu drátu, což je důležité hlavně při ručním svařování. Svar je poté dobře reprodukovatelný s rovnoměrně vneseným teplem. Také to zajišťuje, že se natavená kapka nikdy neoddělí dříve, než dojde ke kontaktu a nevznikne tím rozstřík. K nastavení délky dochází tedy logicky při každém cyklu.



Obr. 28 Princip metody CMT [29]

Ve svařovacím hořáku je umístěn vysoce dynamický servomotor, který ovládá celý proces pohybu vpřed i vzad s potřebnou frekvencí. Kvůli úspoře místa, váhy a zamezení vůlí není mezi motorem a kladkami převodovka. Aby servomotor zvládl fungovat při takových podmínkách je nutné podávat drát do hořáku bez přílišného odporu v bowdenu. Podávací zařízení je velké a v něm umístěný motor nezvládne reverzní otáčení v takové rychlosti, proto byl vytvořen komponent, který je nazýván absorpční vložka. Tato vložka je umístěna na svazku kabelů vedoucích do hořáku a je zavěšena výš, než je svařovaný díl. Vložka vytváří svým tvarem volnou délku drátu pro jeho přísuv k servomotoru a svou pozicí umožní snadný posuv bowdenem. Kontaktní průvlak byl navrhnout tak, aby předával proud přesně na jeho konci. Tato důmyslná konstrukce je vhodná pro více průměrů drátu a opotřebovává se rovnoměrně. Hlavním důvodem vytvoření bylo zamezení předávání proudu na různých místech, což ve skutečnosti měnilo délku výletu drátu. Konstrukce průvlak je na obrázku 29.

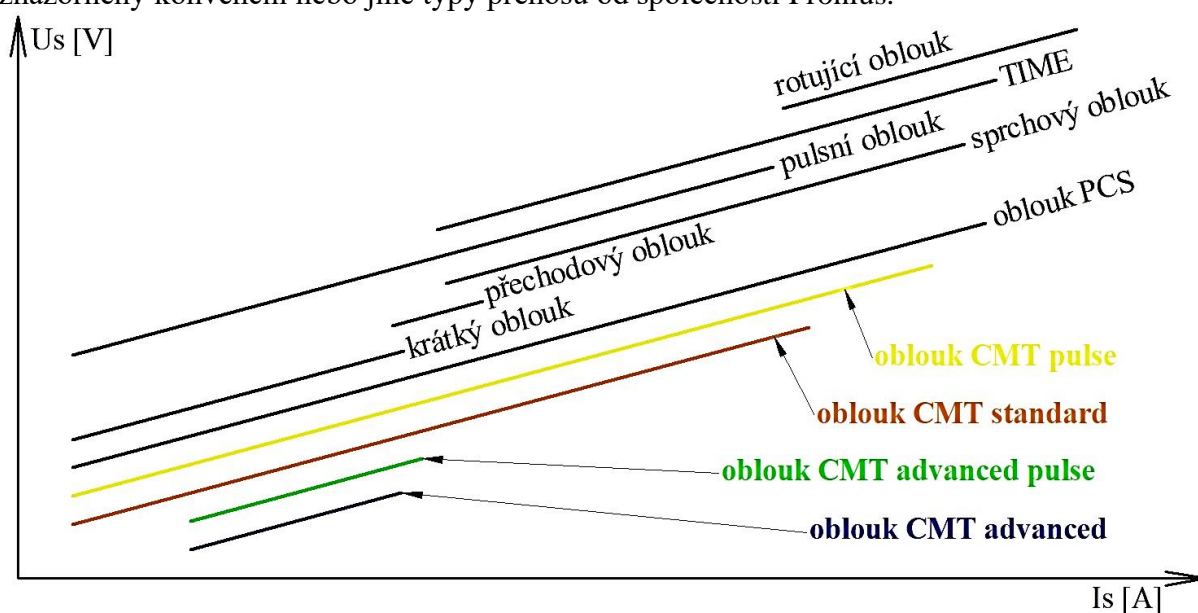


Obr. 29 Průvlak contec [30]

Tato technologie se stala mnohem flexibilnějším přidáním pulsů, čímž vznikla modifikace CMT puls. Průběh je upraven o fázi, kde probíhá bezzkratový pulzní přenos. Cyklus začíná úplně stejně jako předtím, ale po předání kapky tím, že se svařovací drát oddaluje, začíná fáze pulsního přenosu. Do svaru je vnášeno více tepla. V této fázi je možné přidat libovolné množství pulsů, podle toho, kolik tepelné energie je požadováno. Když jich přidáme přibližně deset do jednoho cyklu, výsledky jsou obdobné jako u pulsního přenosu. Rozdíl je ale v metodě regulace délky výletu, ta zůstává stejná jako při klasickém CMT s tím, že k ní dochází vždy pouze při zkratu.

Další modifikací je CMT advanced. Při tomto procesu je tepelné ovlivnění základního materiálu ještě menší než u předchozích variant. Příčinou toho je využití střídavého proudu, a tedy střídání kladné a záporné polarity. Při střídavém proudu vždy když proud jde z kladné do záporné oblasti protne nulu, což způsobuje zhasnutí oblouku u konvenčních metod svařování. Tato metoda využívá zkratové fáze právě pro tuto přeměnu, výsledkem je vysoká stabilita oblouku a velice malé vnesené teplo. Kvalita spojů je výborná a přemostitelnost dosahuje až několika milimetrů.

K této variantě opět vznikla CMT advanced puls, která funguje podobně jako v předchozím případě. Při zkratu dochází ke změně polarity a při oddalování drátu začíná fáze pulzů při jedné polaritě. Na konci této fáze je nataven konec elektrody a drát je přiblížen pro oddělení kapky při zkratu. Polarita je opět prohozena a přenos následuje v pulsním bezzkratovém režimu při druhé polaritě. Oblasti použití metod je na obrázku 30, kde jsou zároveň černou barvou znázorněny konvenční nebo jiné typy přenosů od společnosti Fronius.



Obr. 30 Oblast výskytu metod CMT [29]

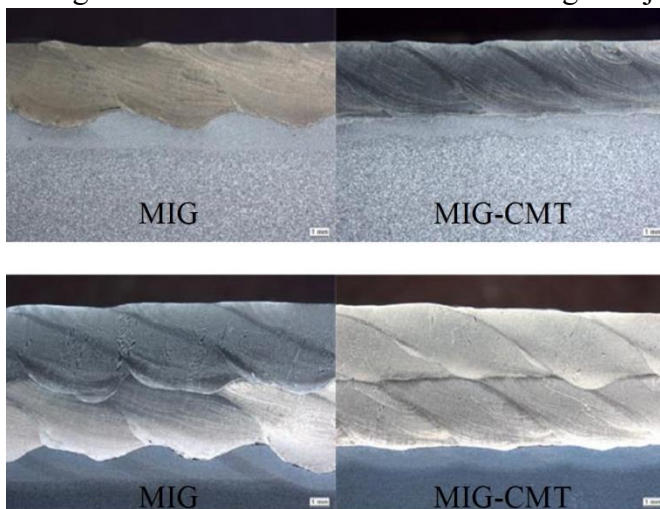
Tyto technologie umožnily rozvoj v oblasti spojování materiálů hliník s ocelí. Hybridní spoj hliník-ocel je používán pro deformační části vozidla. Při nárazu je nutné energii přenést na části hliníku, které jsou deformovány a tím je nějaká část nárazové energie pohlcena. Při dokončení deformace hliníku je ale důležité ochránit životy lidí, a tudíž musí být druhá část vytvořena z materiálu, který nedovolí posunout pevné části do oblasti prostoru posádky. Výsledkem je částečné pohlcení nárazu a tím zvýšení ochrany lidí. Další aplikací může být pájení pozinkovaných plechů nebo vytváření na povrchu materiálu piny. Piny mohou mít zakončení ve tvaru špičky, plochy nebo koule. Možnou variantou je metoda CMT Twin, která používá dva svařovací zdroje a dráty jsou natažené oba do jednoho hořáku, jedná se o vysokovýkonnostní svařování. Nejde pouze o zdvojnásobení množství přidávaného

materiálu, ale různé nastavení posuvů drátů vůči sobě umožňují pokrok pro další rozvoj této metody.

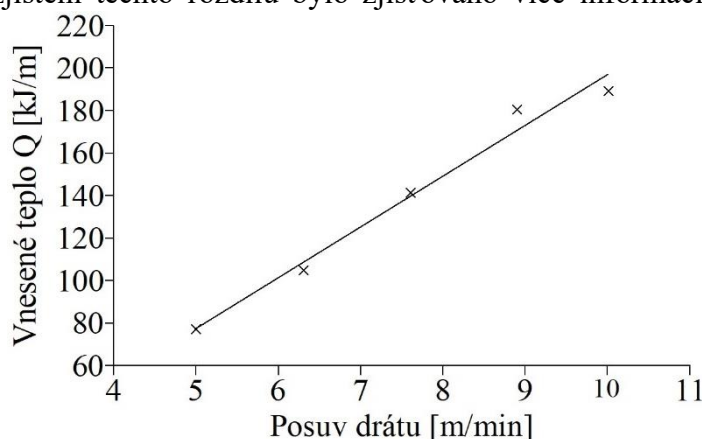
Vytvoření metody CMT, vedlo také k rozvoji navařování. Výkon navařování není oproti jiným metodám zvýšen, pohybuje se okolo 6 kg za hodinu. Rozdílem mezi technologiemi je v možnosti ovlivňování zředění.

Porovnání mezi klasickou metodou MIG a MIG - CMT je patrné z obrázku 31. Pro obě varianty byl použit základní materiál P265GH a přídatný materiál od firmy Böhler nibas 625. Průměr elektrody byl v obou případech 1,2 mm. U návarů na pravé straně je vidět rozhodně menší tepelně ovlivněná oblast, a tudíž muselo být i menší vnesené teplo. Promísení pro klasickou metodu MIG je v první vrstvě 14,49 a ve druhé 2,31 %. Pro metodu CMT je v první návarové vrstvě promísení 5,99 a ve druhé 0,99 %. Tento rozdíl má zásadní vliv pro jakékoliv navařování, protože zředění ve většině případů degraduje svarový kov ať už jde o aplikace pro zvýšení abrazivních vlastností, odolnosti proti korozi nebo jiné. Po zjištění těchto rozdílů bylo zjišťováno více informací o procesu navařování touto metodou. Důležitým krokem bylo stanovení určitých charakteristik, pro nastavování parametrů. Na obrázku 32 je znázorněn vliv rychlosti posuvu drátu na vnesené teplo, pro materiál Inconel 718. Bylo zjištěno, že s rostoucí rychlostí posuvu drátu roste i velikost vneseného tepla na jednotku délky při zachování hodnot ostatních parametrů.

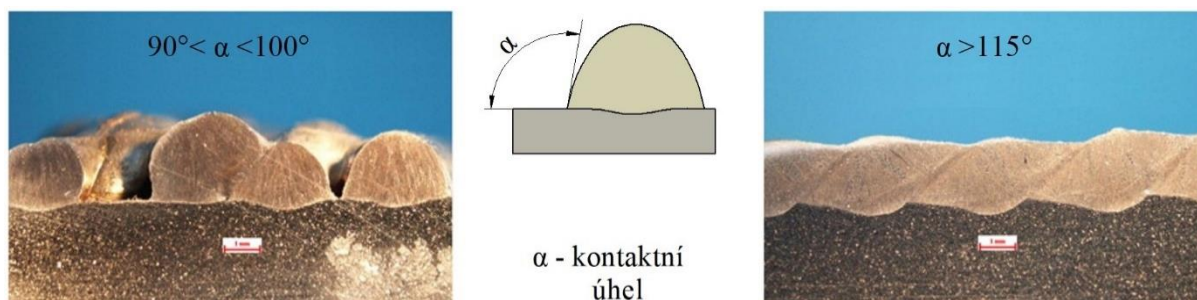
Při změnách parametrů můžeme docílit velice malého zředění a vysoké vrstvy návaru, bohužel to není zcela neomezené, z důvodů geometrie návaru. Byl stanoven kontaktní úhel mezi základním materiálem a návarem. Při vypuklém tvaru je návar vysoký, což může být příhodné pro zajištění velké tloušťky ochranné vrstvy. Kontaktní úhel je okolo  $90^\circ$ , jak je vidět na obrázku 33 a při skládání svarových housenek nelze vytvořit celistvou vrstvu. Pro rovnoměrné navázání mezi jednotlivými návary bylo vyzkoumáno, že je zapotřebí mít kontaktní úhel alespoň  $115^\circ$ .



Obr. 31 Porovnání MIG a MIG-CMT [31]



Obr. 32 Vliv posuvu drátu na Q [32]

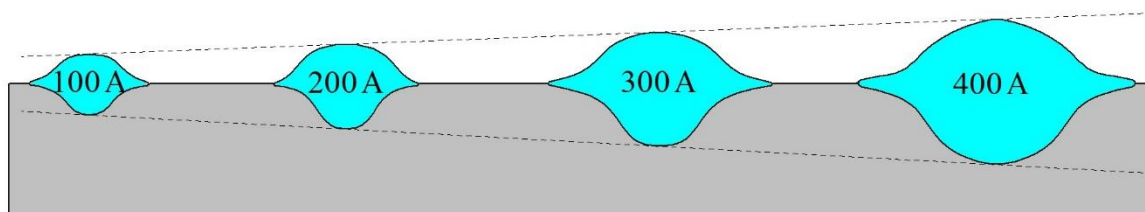


Obr. 33 Kontaktní úhly pro vhodné navařování [33]

### 2.3.5 Svařovací parametry [11] [17] [34] [35]

Jsou to všechny faktory, které vstupují do procesu svařování a ovlivňují kvalitu, hloubku, šířku, promísení a jiné vlastnosti svaru. Výrobci svařovacích zařízení většinou ke svým zdrojům dávají tabulky nebo režimy nastavení pro základní typy materiálu. Parametrů je ale takové množství, že pomocí tabulek není nikdy s jistotou předem známo, jak bude výsledný svar vypadat a jaké bude mít vlastnosti. Je však zajištěna prvotní volba, aby bylo možné parametry pouze optimalizovat na základě znalostí, jak jednotlivý parametr svar mění. První skupinou jsou elektronicky neřízené parametry, které jsou nastavené mechanicky. Mezi tyto parametry patří použitý plyn a jeho průtok, poloha svařování, průměr drátu, volný konec drátové elektrody nebo postupová rychlost svařování. Do druhé skupiny poté spadají parametry nastavované přímo na zařízení a patří mezi ně svařovací proud, napětí a rychlost posuvu drátu. U novějších svařovacích zařízení lze upravovat charakteristiky proudového zatížení, frekvenci zkratů a jiné parametry vázající se na konkrétní modifikaci MIG/MAG.

- Svařovací proud má na svar nejvýznamnější vliv. S rostoucím proudem jsou zvětšovány síly působící na kapku kovu a ta je natavována rychleji a předávána do svaru s vyšší frekvencí při menším objemu. Má vliv také na způsob přenosu kovu. Na obrázku 34 je výstižně ukázán vliv velikosti proudu na tvar svarového kovu.

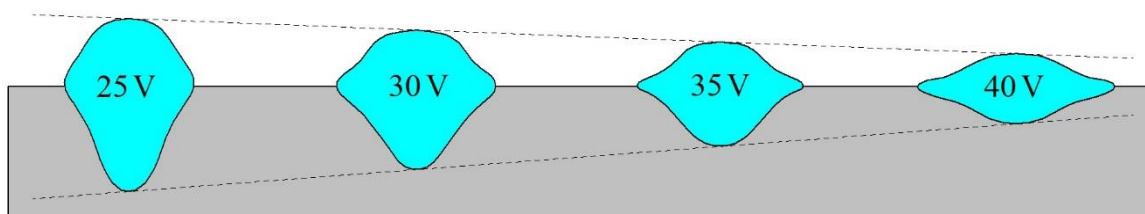


Obr. 34 Závislost tvaru svarové housenky na intenzitě proudu [11]

- Napětí ovlivňuje především šířku svaru. Na rychlost odtavování má malý vliv, ale velký vliv má společně s proudem na určování způsobu přenosu kovu. Na obrázku 35 je znázorněn vliv napětí na tvar svaru. Je důležité ho nastavit správně pro stabilitu oblouku a princip samoregulace drátu. Pro nastavení je uveden vztah:

$$U = 15 + 0,035 \cdot I \quad (2.3)$$

kde:  $U$  je napětí [V],  
 $I$  je proud [A].



Obr. 35 Závislost tvaru svarové housenky na napětí [11]

- Plyn u metody MIG/MAG jsou používány plyny  $\text{CO}_2$ , Ar, He,  $\text{O}_2$  a jejich různé kombinace. Každý z těchto plynů má jiné vlastnosti a namícháním různých směsí je docíleno optimálních vlastností pro konkrétní případy. Oxid uhličitý je těžší než vzduch a má dobrou tepelnou vodivost. Přispívá ke stabilitě oblouku. Při použití tohoto plynu dochází k exotermické reakci, která přidává do svarového kovu velké množství tepla, a to přispívá ke svarům s hlubokým závarem. Zvyšuje povrchové napětí, což způsobuje kapkový přenos a rozstřík.



Argon je inertní plyn a čistý je používán při svařování neželezných kovů, které jsou náchylné na oxidaci. Má nízkou ionizační energii, ale nízkou tepelnou vodivost a vytváří nestabilní oblouk. Svary mají v porovnání s oxidem uhličitým vysoké převýšení a nízký průvar.

Helium je druhý používaný inertní plyn, který má dobrou tepelnou vodivost oproti argonu. Tím způsobuje hlubší a širší svar s nižším převýšením. Jeho cena je ovšem dost vysoká a je lehčí než vzduch, a tudíž je nutné používat větší průtok, proto je pro metodu MIG používána pouze směs těchto dvou plynů.

Pro metodu MAG je mimo domácí použití takřka vždy používaná směs, která má jako základ argon. Jako příměsi jsou používány plyny CO<sub>2</sub>, He nebo O<sub>2</sub> v různých poměrech. Kyslíku je použito pouze několik málo procent. Je tím zvýšena tekutost svarové lázně a odplynění. Průtok plynů musí být dostatečný pro ochranu svarové lázně.

- Polohy svařování jsou zjednodušeně od polohy vodorovného svařování shora do polohy svařování nad hlavou odstupňované po 45° na PA, PB, PC, PD a PE. Polohy svislé jsou odshora dolů PG a naopak PF. Pro svařování trubek jsou navíc polohy H-L a J-L. Poloha má určitý vliv na přenos kovu a jsou doporučeny určité úhly natočení hořáku, které by svářeč měl znát. V případě robotizovaného svařování je vše nastaveno programem tak, aby měl hořák všude přístup a byla dodržována konstantní vzdálenost. Při vedení hořáku vpřed je zvětšována šířka svaru a zmenšuje se průvar a při svařování vzad je to obráceně. Na robotizovaném pracovišti je možné nastavit vedení hořáku pod úhlem 90 °, což vytváří kompromis mezi svařováním vpřed a vzad.
- Vliv průměru drátu a rychlosti jeho podávání je jednoznačný. Průměr drátu ovlivňuje proudovou hustotu, což znamená, že s menším průměrem drátu docílíme užšího svaru s větším průvarem. Rychlost posuvu také souvisí s proudem. S rostoucí rychlostí podávání roste proud, tedy i průvar. Tyto parametry jsou voleny z hlediska požadavku objemu přídavného materiálu a ostatní parametry jsou jim přizpůsobené.
- Volný konec drátu má důležitý vliv na svařování. Při zvětšující se vzdálenosti mezi kontaktním průvlakem a svařovaným materiálem klesá proud a roste napětí. Podle toho také vypadá geometrie svaru. Pro nastavení existuje jednoduchý vztah, jak délku určit. Výlet by měl být roven 10x průměru drátu a u směsi plynu navíc dva milimetry. Každý další milimetr je ztráta okolo 10 až 20 A.
- Rychlost vedení hořáku je dalším parametrem, který je velice zásadní. Požadavek je, aby bylo svařování co nejrychlejší. Při výpočtu vneseného tepla je ve jmenovateli přímo svařovací rychlost. To znamená, že při zvyšování rychlosti klesá předávané teplo do svaru, a to ovlivňuje jeho geometrii. S rostoucí rychlostí je základní materiál málo nataven a svar je mělký a široký, zatímco při pomalé rychlosti je svar úzký, hluboký a převýšený. Vzorec pro výpočet vneseného tepla je odvozen z výkonu a účinnosti přenosu. Tato účinnost je stanovena jako konstanta pro jednotlivé technologie. Výpočet vneseného tepla vypadá takto:

$$Q = \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot \eta \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.4)$$

kde:  $Q$  je specifické vnesené teplo [ $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ ],  
 $v_s$  je svařovací rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ].  
 $\eta$  je účinnost přenosu tepla [-]

### 3 NIKL A JEHO SLITINY [36] [37] [38]

Nikl je stříbrošedý kov, který je na vzduchu velmi stálý, odolný proti zásadám a má velice dobrou tažnost. Zachovává si výborné mechanické vlastnosti při vysokých nebo naopak nízkých teplotách. Při tváření vykazuje rychlé a velké zpevnění. Teplota rekrytalizace se pohybuje okolo 600 °C. V přírodě se většinou vyskytuje ve sloučeninách s oxidy, sulfidy nebo silikáty. Jeho koncentrace na zemi je vysoká, ale osamostatnit ho od ostatních prvků je nákladné. Postup výroby záleží na rudě, ve které se nachází, používá se tavení, elektrolýza nebo uhlíková redukce. V čistém stavu se nachází s železem v meteoritech. Čistý nikl má hodnotu meze pevnosti pouze 220 MPa ve stavu nezpevněném po odlití a nemá příliš mnoho aplikací. Jeho fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti se začínou výrazně zlepšovat ve sloučeninách. Je používán jako přísada do ocelí pro dosažení lepší vrubové houževnatosti a tažnosti nebo pro přeměnu ocelí na austenitickou strukturu. Používá se pro aplikace v chemickém, energetickém, raketovém nebo kosmickém průmyslu. Hojně využití je pro povlakování méně odolnějších kovů. V tabulce 1 je souhrn základních fyzikálních vlastností.

Má negativní vliv na lidský organismus. Nebezpečí však hrozí jen při dlouhodobém styku. Ve většině případů se jedná o alergii, způsobující zarudnutí kůže nebo otoky. Setkat se s tím je možné například u náušnic.

Tabulka 1 Základní fyzikální vlastnosti niklu [37] [38] [39]

| Vlastnost                           | Značení                 | Hodnota | Jednotka                      |
|-------------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|
| Relativní atomová hmotnost          | $A_r$                   | 58,69   | -                             |
| Teplota tání                        | $T_T$                   | 1453    | °C                            |
| Teplota varu                        | $T_v$                   | 2913    | °C                            |
| Hustota                             | $\rho$                  | 8908    | $kg \cdot m^{-3}$             |
| Hustota při teplotě tání            | $\rho_{(T_T)}$          | 7810    | $kg \cdot m^{-3}$             |
| Tepelná vodivost                    | $\lambda$               | 91      | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| Součinitel tep. délkové roztažnosti | $\alpha_{(20^\circ C)}$ | 13,3    | $10^{-6} \cdot K^{-1}$        |
| Elektrický odpor                    | $R_{(20^\circ C)}$      | 6,844   | $\mu\Omega \cdot cm$          |
| Tvrdost podle Vickerse              | $HV$                    | 638     | -                             |
| Tvrdost podle Brinella              | $HB$                    | 700     | -                             |
| Modul pružnosti ve smysku           | $G$                     | 76      | GPa                           |
| Modul pružnosti v tahu              | $E$                     | 216,2   | GPa                           |
| Curieův bod                         | $T_c$                   | 357     | °C                            |
| Struktura                           | -                       | FCC     | -                             |
| Mřížková konstanta                  | $a$                     | 0,35168 | nm                            |

V niklu je možné rozpouštět větší množství legujících prvků než v železe a z těchto důvodů je možné ho používat pro náročnější aplikace. Některé prvky však výrazně zhoršují jeho vlastnosti. V mnoha případech jsou omezovány na velice nízké koncentrace.

Uhlík je jedním z těchto prvků. Ve slitině má jen nízkou rozpustnost a při překročení dochází k segregaci uhlíku ve formě grafitu na hranicích zrn, to snižuje jeho mechanické vlastnosti za vyšších teplot. Pro použití za vysokých teplotách je doporučeno snížit jeho množství pod 0,02 hm. %.

Síra je druhým prvkem, který je ve slitinách omezován z důvodu nepříznivých vlastností. Rozpustnost ve struktuře je pouze 0,005 hm. %. S niklem jsou vytvářena nízkotavitelná eutektika na hranicích zrn. Při koncentraci pouhých 0,002 hm. % dochází při teplotách 645 k výraznému snížení mechanických vlastností. Síra působí nepříznivě na tažnost i při pokojových teplotách.

Mangan vytváří se sírou sulfid manganatý. To snižuje nepříjemné účinky síry za vyšších teplot. Také zvyšuje odolnosti proti oxidaci.

Zirkon dokáže zlepšit plastické vlastnosti niklových slitin v celém rozsahu používaných teplot.

Křemík je používán pro navázání kyslíku, který by se jinak navázal na mangan a ten by nemohl vytvořit sloučeniny se sírou. Zvyšuje odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. Při vyšších obsazích železa, kobaltu, molybdenu nebo wolframu je ve struktuře limitován. Běžná koncentrace bývá 0,3 hm. %.

Kobalt je prvek, který vytváří sloučeniny se sírou a ty jsou odolnější proti vysoké teplotě než síra ve spojení s niklem. Dále zvyšuje rozpustnost uhlíku, čím je zvýšena ochrana proti nauhličení za vyšších teplot.

Železo je používáno pro snížení ceny niklu. Zvyšuje rozpustnost uhlíku stejně jako kobalt, ale nijak nepřispívá ke zlepšení vlastností.

Měď je používána pro zvýšení odolnosti proti neoxidačním kyselinám. Již při 2-3 hm. % je zvýšena odolnost proti HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Chrom je v niklu dobře rozpustný jeho obsahy mohou být až do 50 hm. %. Výrazně zvyšuje odolnost proti oxidačním prostředím a přispívá ke vzniku tenké pasivační vrstvy.

Wolfram je přidáván do slitin pro zvýšení pevnosti za vysokých teplot. Zvyšuje odolnost proti korozi a neoxidačním kyselinám. Tento prvek je velice drahý a podobný účinek má i molybden, proto je využíván více.

Pro odsíření je také možné použít hořčík nebo beryllium. Jsou účinné již při nízkých koncentracích.

CEN ISO/TR 15608 je normou pro zařazení všech materiálů z hlediska přehlednosti a možnosti oprávnění ke svařování. Nikl začíná číslem 4 a následuje druhé číslo pro bližší určení, jak je možné vidět v tabulce 2.

Tabulka 2 Rozdělení niklu a slitin niklu [37]

| Skupina | Druh niklu a slitin niklu  |
|---------|--|
| 41      | Čistý nikl   |
| 42      | Slitiny niklu a mědi (Ni-Cu) s $Ni \geq 45 \%$ , $Cu \geq 10 \%$                                   |
| 43      | Slitiny niklu a chrómu (Ni-Cr-Fe-Mo) s $Ni \geq 40 \%$   |
| 44      | Slitiny niklu a molybdenu (Ni-Mo) s $Ni \geq 45 \%$ , $Mo \leq 32 \%$                              |
| 45      | Slitiny niklu, železa a chrómu (Ni-Fe-Cr) s $Ni \geq 31 \%$  |
| 46      | Slitiny niklu, chrómu a kobaltu (Ni-Cr-Co) s $Ni \geq 45 \%$ , $Co \geq 10 \%$                     |
| 47      | Slitiny niklu, železa, chrómu a mědi (Ni-Fe-Cr-Cu) s $Ni \geq 45 \%$                               |
| 48      | Slitiny niklu, železa a kobaltu (Ni-Fe-Co-Cr-Mo-Cu) s $31 \% \leq Ni \leq 45 \%$ a $Fe \geq 20 \%$ |

Další možností, jak rozdělit nikl a jeho slitiny je podle použití, toto rozdělení je přehlednější, ale pro účely identifikace pro svařování je používáno číselné označení z předchozí tabulky. Rozdělení podle použití je:

- Konstrukční slitiny niklu
- Slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi
- Žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu
- Superslitiny niklu

### 3.1 Superslitiny niklu [36] [37] [38]

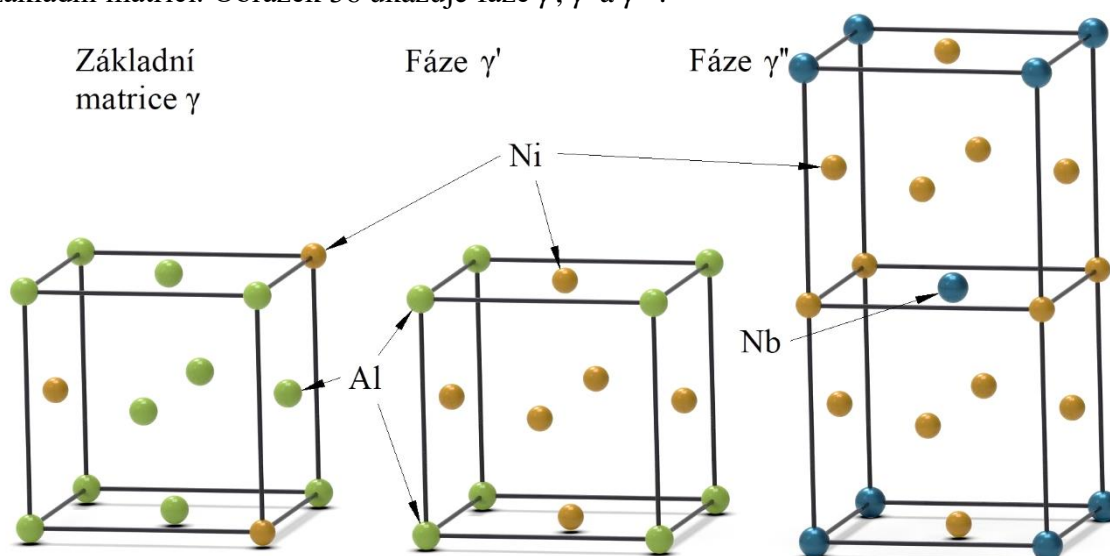
Niklové superslitiny jsou specifické vysokou odolností proti oxidaci, korozi a poklesu pevnostních vlastností za vysokých teplot. Rovněž jsou odolné proti vysokoteplotnímu creepu a mají výborné únavové vlastnosti. Samotný nikl má kubickou plošně středěnou mřížku. Pro vytvoření dostatečné ochrany proti oxidaci a korozi za vysokých teplot jsou nejdůležitější prvky Cr a Al. Tyto prvky vytváří stabilní ochranou oxidickou vrstvu. Mechanismy zpevnění a prvky, které jej způsobují jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3 Vliv jednotlivých prvků a jejich funkce [36]

| Kl. vlivu | Prvky matrice   | Prvky tvořící $\gamma'$ nebo $\gamma''$ fázi | Karbidotvorné prvky             | Aktivní prvky na hranicích zrn                   |
|-----------|---|--|---------------------------------|--|
| Prvky     | Co, Fe, Cr, Mo, W, V, Ti, Al  | Al, Ti, Nb, Ta                               | Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, Ti, Hf    | Zr, B  |
| Funkce    | Substituční zpevnění Ni matrice. Al a Cr současně zvyšují odolnost proti korozi | Precipitační zpevnění Ni matrice             | Blokování pohybu zrn při creepu | Zvýšení creepové pevnosti a lomové houževnatosti |

Základní matrice niklových slitin je austenit neboli fáze  $\gamma$ . Tuto matici je možné zpevnit substitučně, to znamená, že jsou některé atomy ze základní mřížky nahrazeny prvky jinými. Zpevnění je zajištěné pouze dostatečným množstvím legujících prvků a je zachováno až do teploty 810 °C.

Podstatně větší vliv na zpevnění má fáze  $\gamma'$  a  $\gamma''$ . Prvky, které ji tvoří jsou ve žlutém sloupci, přičemž první tvoří prvky hliník a titan a druhou niob a tantal. Obě nové, mají stejnou funkci, záleží na legujících prvcích, která bude vytvořena. Fáze jsou si velice podobné a mají nízkou mezifázovou energii. To zaručuje stabilitu až do vysokých teplot, dokud není precipitát rozpuštěn při teplotě až okolo 1000 °C. Podmínkou pro vznik precipitátů je vysoký obsah niklu v základní matici. Obrázek 36 ukazuje fáze  $\gamma$ ,  $\gamma'$  a  $\gamma''$ .

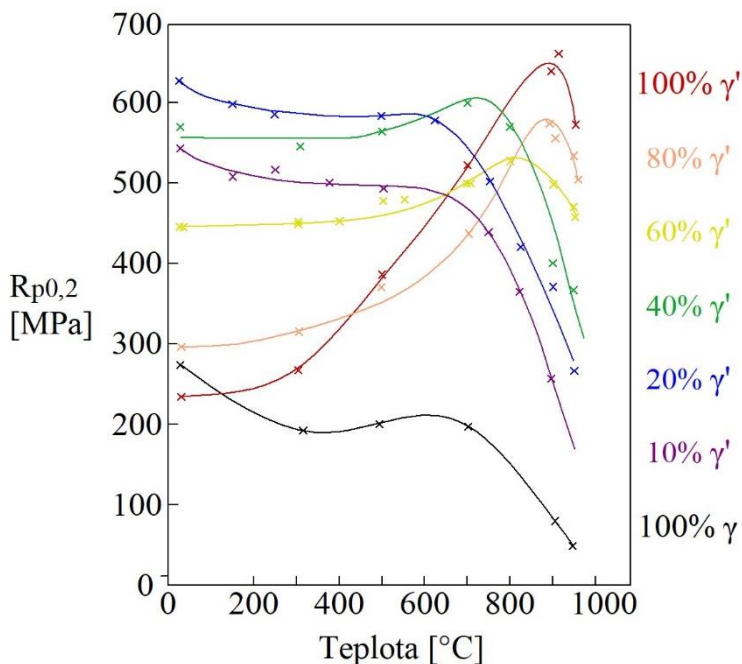


Obr. 36 Základní matrice a precipitáty [38] [40]

Slitiny jsou vyráběny s různým podílem  $\gamma'$  případně  $\gamma''$  fáze ve struktuře. Důvodem je odlišná hodnota meze kluzu v závislosti na teplotě. Nejvyšší hodnoty meze kluzu za vysokých teplot má samotná  $\gamma'$  fáze a se snižujícím se obsahem klesá. Naopak při nižších teplotách vykazuje výborné hodnoty složení s 10 až 20 %. Při překonání hranice 20 % vykazuje materiál



pokles meze kluzu při nízkých teplotách. Při koncentraci okolo 40 % je pro zvyšující se teploty křivka bez poklesu pevnosti a následně stoupá. Je to způsobeno tím, že zpevňující efekt není konstantní, ale s rostoucí teplotou je zvyšován. V této koncentraci začíná být precipitační zpevnění výrazné i při nízkých teplotách natolik, že nedojde k poklesu meze kluzu při nižších teplotách. K blíží se rozpustnosti mez kluzu výrazně klesá. Pro 80% až 100% fázi  $\gamma'$  je nejvyšší hodnota při teplotách okolo 900 °C. Obrázek 37 tyto charakteristiky znázorňuje. Veliký vliv na precipitační vytvrzování má velikost a tvar zpevňujících fází. Je ovlivňována především chrómem a tepelným zpracováním, s rostoucím časem na vysokých teplotách dochází ke zhrubnutí. Ve strukturách se objevují i jiné fáze než zatím zmíněné. Tyto nové fáze nepřispívají ke zpevnění, většinou působí negativně. Když je obsah titanu, tantalu nebo niobu vysoký, vzniká fáze  $\eta$  nebo  $\delta$ . Další objevující se fází je  $\sigma$ , která je závislá především na obsahu Cr, Fe, Mo. Další fází, které se snažíme vyhnout je Lavesova, díky které dochází ke snížení tažnosti.



Obr. 37 Záv.  $R_{p0,2}$  na teplotě pro různá množství  $\gamma'$  [40]

Karbidy v superslitinách jsou typu MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  a  $M_6C$ . Některé jsou stabilní a jiné nestabilní. Mohou mít příznivý vliv na blokování pohybu zrn při vysokých teplotách, podle toho, kde jsou vyloučeny. Při vyloučení na hranicích zrn jde o příznivý efekt, ale plasticita je snižována. Při výskytu mezi krystaly, ale i uvnitř způsobují snížení plastických vlastností a zároveň neblokují pohyb zrn. Prvotní karbidy jsou MC, které jsou nestabilní a přetransformují se tepelným zpracováním na typ  $M_{23}C_6$ . Na tento typ jsou transformovány i  $M_7C_3$ . Poslední transformací přejdou karbidy na stabilní  $M_6C$ .

Poslední možností, jak zpevnit superslitiny je použití prvků boru (B) nebo zirkonu (Zr). Prvky se vyskytují na hranicích zrn a nahrazují vakance. Důsledkem toho je zpomalování difuze a zvýšení odolnosti proti creepu. Rovněž je zvýšena lomová houževnatost. Lom, který byl předtím mezikrystalický je nyní transkrystalický. Prvky ve slitině nemají vysokou koncentraci, pro aktivitu na hranicích zrn stačí opravdu malé množství.

Superslitiny jsou vytvrditelné, a proto je vhodné tepelné zpracování. Je rozděleno na dva kroky. V prvním je provedeno rozpouštěcí žíhání, které probíhá za velice vysokých teplot (1150 - 1315 °C). Následuje rychlé ochlazení, aby došlo k vyloučení přesyceného roztoku. Jeho rozpad je druhým krokem postupu, které je nazýváno umělé stárnutí. Probíhá za teplot 420 - 870 °C. Tuhý roztok se rozpadne na fázi  $\gamma'$ . Celý tento postup je opakován až 7x.

Dalším možným tepelným zpracováním je rekrytalizační žíhání nebo žíhání pro snížení napětí. Rekrytalizační žíhání je prováděno pro obnovu plasticity po procesu tváření za studena. Teploty se pohybují v rozmezí 700 - 1200 °C. Žíhání pro snížení napětí je prováděno po precipitačním vytvrzování v rozmezí teplot 420 - 870 °C. Struktura tímto procesem není rekrytalizována.

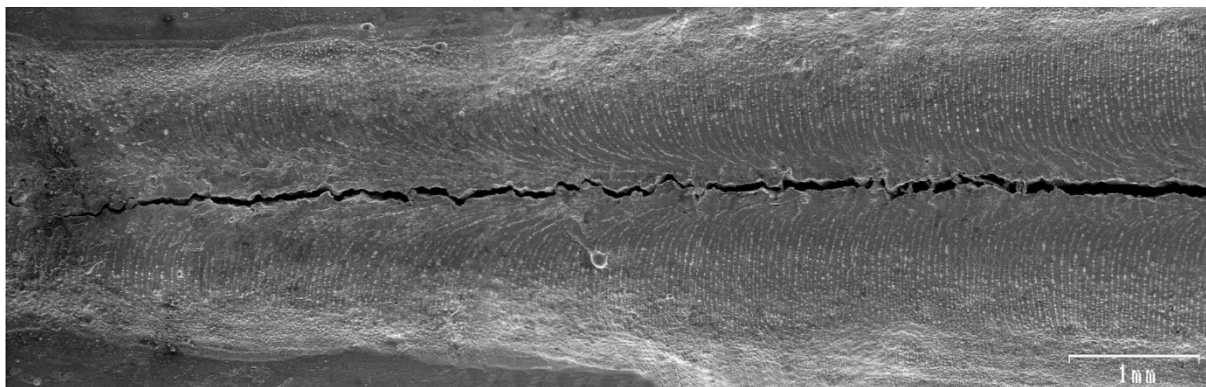
### 3.2 Svařování niklových slitin [37] [41] [42] [43]

Nikl je citlivý na znečištění. Při skladování je vhodné oddělit ho od ostatních materiálů. Před zahájením svařování je nutné očistit povrch. Jsou doporučena acetonová ředidla. Při potřebě opracovat povrch jiným způsobem, je vhodné použít korozivzdorné nástroje, čisté oblečení a rukavice. Prvky, mající negativní vliv na svařování jsou C, S, P, O, N. Tyto prvky nijak nepomáhají a vytvářejí nízkotavitelná eutektika, opatření proti těmto prvkům je pouze snížení jejich obsahu nebo navázání je na prvky, které jsou stabilnější za vysokých teplot. Obsah uhlíku je limitován na 0,2 %, síry a fosforu pod 0,015 %, kyslíku a dusíku pod 0,005 %. Dalšími prvky, které se podílejí na svařitelnosti jdou B, Fe, Cr, Si. Vždy jde o zvolení vhodné kombinace těchto prvků, protože mají svoje opodstatnění v niklových slitinách. Například při vysokých obsazích železa je křemík redukován.

Zahájit svařování je vhodné po rozpouštěcím žíhání. Struktura slitin je austenitická a je náchylná ke vzniku trhlin za tepla. Nejvíce ohrožená je hrubozrnná struktura, protože mechanismus vzniku trhlin funguje tak, že vzniklé fáze, kterým je snaha zabránit penetrují na hranice zrn, způsobují tahová napětí a vznik trhlin. Při hrubé struktuře je plocha hranic zrn malá a náchylnost na trhliny vyšší. Zhrubnutí struktury je ovlivněno teplem, a proto je nutné používat metody a parametry svařování, které ho přenáší co nejméně. Teplota interpass nesmí překročit 150 °C. Součet obsahu prvků hliníku a titanu by neměl překročit 5 %, hrozí vznik trhlin a doporučuje se svařovat laserem nebo elektronovým paprskem.

Další možnou komplikací, která může nastat je pórovitost svarového kovu, způsobenou kyslíkem, vodíkem, dusíkem nebo nečistotami z nedokonalého očištění.

Pro svařování elektrickým obloukem hraje důležitou roli čistota používaného plynu. Používá se argon a helium nebo vícesložkové směsi, jejich čistota musí převyšovat 99,996 %. Pro svařování niklových slitin s obsahem chromu a železa je vhodné zajistit ochranu nejen svarové lázně, ale i zahřátého svaru. Svarová lázeň má vysokou viskozitu, podporují ji prvky titan, hliník a niob. Pro zajištění korozní odolnosti se musí dbát na železo, které bývá obsažené v okolních materiálech a mělo by se zabránit možné kontaminaci. Při navařování je rovněž důležité hlídat hodnotu promísení. Na obrázku 38 je ukázka trhliny vzniklé za horka ve svarovém kovu u konstrukční oceli.



Obr. 38 Trhlina vzniklá za horka [44]

#### 4 PRAKTICKÁ ČÁST [45] [46] [47]

Navarovací materiál, který bude použit je Inconel 625. Je zařazen mezi niklové superslitiny. Základní materiál může být různý, podle požadavku zákazníka. Existuje určité spektrum žárupevných materiálů používaných pro tyto účely.

V praxi je pro vytváření nových bloků membránových stěn použito robotické zařízení, bez kterého by navařovaná vrstva byla nekvalitní. Při opravách, pokud je to možné je vyříznut blok, který je vyjmut a podle rozměrů vyroben nový ve vhodném prostředí a poté je přivařen na místě. Existují také mobilní zařízení, která jsou připevněny pomocí magnetů na prostor mezi trubkami a může být proveden návar přímo na místě, obrovskou nevýhodou tohoto řešení je rychlost, ztížené podmínky kontroly a nedostatečné chlazení, které by mělo proudit navařovanými trubkami pro zajištění vysoké kvality. Při opravách malých detailů nebo při nemožnosti vyjmout část bloku, je použito ruční navařování.

Celková problematika navařování stěn v dílenském prostředí spočívá nejen v samotném nastavení a optimalizaci svařovacích parametrů, ale také v navržení postupu kladení housenek. Vše musí být sladěno dohromady. Po dokončení ochranné vrstvy na celém bloku je nutné provést řadu zkoušek, aby bylo zaručeno, že je díl v pořádku. Zkoušky pro návary na membránové stěny nejsou specifikovány normou, ale existuje mnoho doporučení od odborníků, kteří doporučují určité typy. Zákazník si poté může sám specifikovat omezení, přes které musí díl projít. Základem je vždy vizuální kontrola ihned po navaření. Kontroluje se 100 % povrchu, což je u takto rozměrných součástí poměrně problematické. Vždy se postupuje od nejlevnějších zkoušek po ty nejdražší nebo časově nejnáročnější, je možné, že bude odhalen takový defekt, že bude dílec nepoužitelný nebo bude muset být opraven. Následuje měření tloušťky ochranné vrstvy. Měří se buď přímo nebo nepřímě. Nepřímé měření je ultrazvukové, kdy je změřena celá tloušťka materiálu a musí být odečtena tloušťka trubky nebo ploché tyče, podle toho, kde probíhá měření. Přímá metoda, která je nejvíce používána je založen na magnetickém principu, protože navařená vrstva není magnetická, zatímco základní materiál ano. Poté následuje měření množství železa na povrchu návarové vrstvy, přičemž nejčastější požadavek bývá maximálně do 5 % Fe. Další zkouška je penetrační, pomocí níž jsou hledány trhliny. Zajímavou vlastností, která není vůbec ve zkouškách zahrnuta je hladkost povrchu návaru, ukazuje se, že při hrubém povrchu začne materiál korodovat dříve.

Navarované stěny používané v elektrárnách na spalování odpadů, jsou kvůli vzniku velice agresivních látek namáhány nejvíce. Provozní teplota je okolo 450 °C. Tuto teplotu vydrží i materiály bez návarové vrstvy, ale jejich životnost je velice rozdílná. U prostorů kotle, kde dochází ke spalování vydrží nenařené membránové stěny 6 až 9 měsíců, zatímco navařené inconelem 625 vydrží 3 až 4 roky. Obrázek 39 ukazuje korozi u spaloven odpadů.



Obr. 39 Koroze membr. stěny ve spalovně odpadů [48]

Pro samotné stanovení procesních parametrů navařování není důležité, jestli je provedeno na bloku membránové stěny nebo na plechu o shodné tloušťce s uzpůsobeným chlazením. Při rovinném podkladu je návar přehlednější a lze z něj snáze určit potřebné změny případně vyříznout potřebné úseky pro zkoumání mikro nebo makro struktury, zatímco tvar membránové stěny zachycuje reálnou situaci. Je tedy vhodné nastavit a optimalizovat parametry pro návar na ploché desce a poté vyzkoušet tyto parametry i na reálném dílcu, kde se bude předpokládat, že parametry budou vyhovující nebo bude změna pouze minimální.



#### 4.1 Inconel 625 [49] [50] [51]

Řadí se mezi superslitiny niklu, jeho chemické složení je v tabulce 4. Pokud je použit jako přídavný materiál má mírně odlišné chemické složení. Příklad chemického složení elektrod od firmy Böhler je v tabulce 5. V podstatě se u přídavných materiálů mění hlavně prvky, kterých by mělo být co nejméně, pro přínos jejich špatných vlastností, těmito prvky jsou hlavně uhlík a železo. Struktura je austenitická. Místo hliníku a titanu je použit niob a tantal. Společně s molybdenem je tato kombinace výborná pro veliký rozsah aplikací od kryogenních teplot až do teplot 815 °C, kdy má slitina stále dobré mechanické vlastnosti.

Tabulka 4 Chemické složení Inconelu 625 [50]

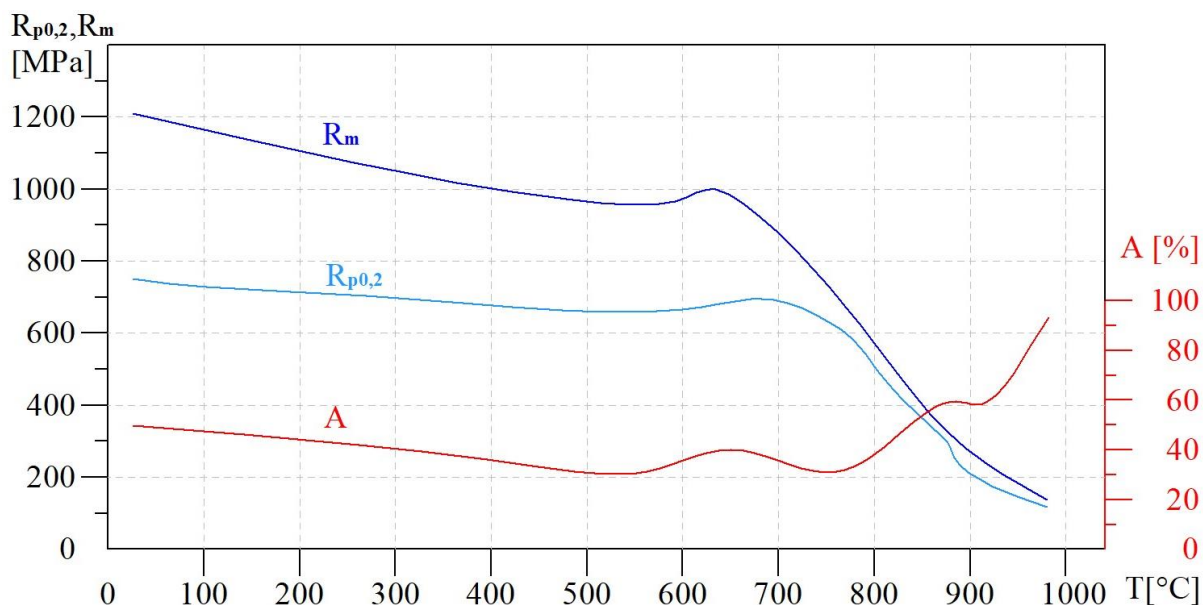
| Prvek   | Ni   | Cr   | Fe  | Mo   | Nb+Ta | Co  | Al  | Ti  | Mn  | C   | Si  | P     | S     |
|---------|------|------|-----|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| Min [%] | 58,0 | 20,0 |     | 8,0  | 3,15  |     |     |     |     |     |     |       |       |
| Max [%] |      | 23,0 | 5,0 | 10,0 | 4,15  | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,1 | 0,5 | 0,015 | 0,015 |

Tabulka 5 Typické chemické složení elektrody Nibas 625 [51]

| Prvek   | Ni | Cr   | Fe    | Mo  | Nb  | Co       | Al      | Mn  | C     | Si  |
|---------|----|------|-------|-----|-----|----------|---------|-----|-------|-----|
| Hmot. % | 63 | 22,0 | max 1 | 9,0 | 3,3 | max 0,05 | max 0,4 | 0,7 | 0,025 | 0,4 |

Mechanické vlastnosti jsou velice dobré v porovnání s oceli. Na obrázku 40 je zobrazena mez pevnosti, mez kluzu a tažnost ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ ) při různých teplotách pro Inconel 625 po rozpouštěcím žíhání. Pro konstrukci jsou důležité také únavové charakteristiky a odolnost proti creepu. Tyto vlastnosti jsou také velmi dobré. Mechanické vlastnosti jdou ovlivnit tepelným a chemickým zpracováním. Používá se rozpouštěcí žíhání, vytvrzování a moření. Pro zaměření na žárupevné aplikace je možné zpracovat slitinu pro teploty až k 1000 °C.

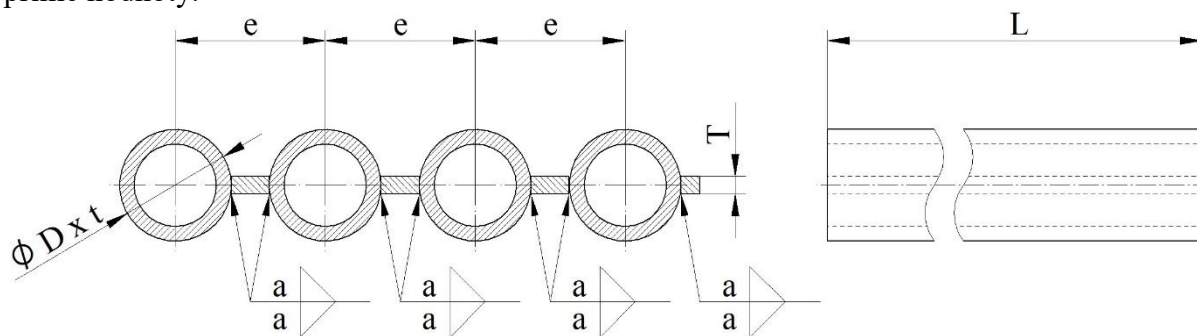
Výborně odolává slané nebo brakické vodě, některým kyselinám i zásadám a také proti důlkové a štěrbinové korozi. Aplikace, pro které je materiál používán jsou lodní, chemický, ropný, jaderný, kosmický, letecký a energetický průmysl. Velké využití je pro podmínky, kde se nachází směsi s chlorem, proti kterým odolává málo typů materiálů. Hutní průmysl vytváří různé polotovary, trubky, tyče kruhové nebo čtvercové, plechy, atd. Inconel 625 má také dobrou svařitelnost a je často používán jako ochranná vrstva.



Obr. 40 Závislost mechanických vlastností na teplotě Inconelu 625 [50]

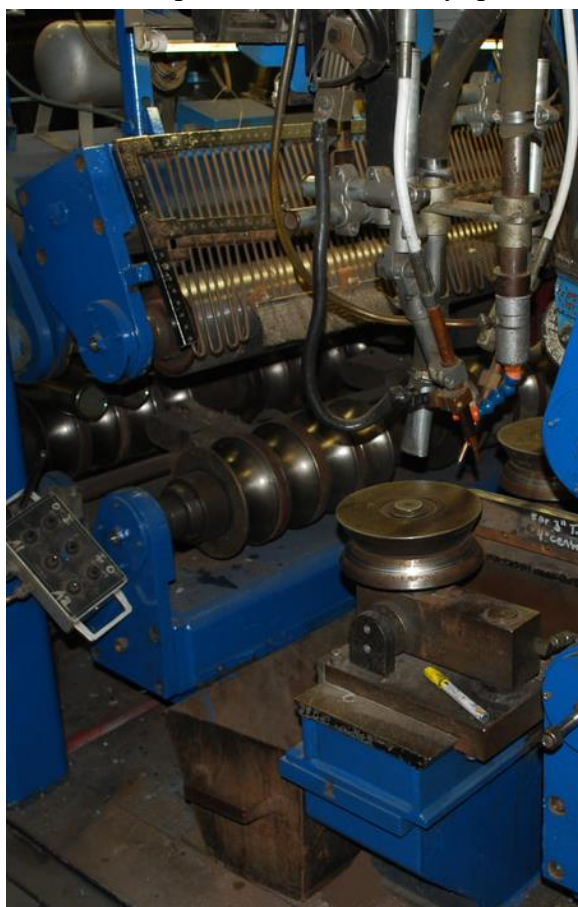
## 4.2 Výroba membránových stěn [45] [46] [52]

Membránové stěny jsou základem pro kotle v energetickém průmyslu. Skládají se z trubek a pásků a posléze jsou podle projektu vkládány různé komponenty pro přívod paliva nebo vzduchu případně další účely. Komponenty je nutné přivařovat ručně, nejčastěji metodou TIG. Na výrobu membránových stěn může být vytvořena automatická linka. Rozměry dílů jsou podle výpočtů konstruktéra vždy rozdílné a mají mnoho variant. Obrázek 41 ukazuje základní rozměry předepsané od konstruktéra. Z důvodu mnoho existujících variant nejsou na obrázku přímé hodnoty.



Obr. 41 Ukázka membránové stěny [vlastní tvorba]

Výroba na automatizované lince musí být kvůli změnám rozměrů velmi variabilní. Délky, na výkrese označené písmenem  $L$ , jsou omezené výrobou, mohou být dlouhé až 25 m, ale nejběžnější jsou požadavky do 7 metrů. Trubky jsou od většiny výrobců v délkách do 6 m a pro delší membránové stěny je tedy nutné je prodlužovat. V prvním kroku trubky prochází tryskačem, pro zbavení oxidů, mastnoty a nečistot. Ve druhé části je na všech trubkách vytvořen úkos na automatickém stroji a následuje jejich spojování. Po spojení jsou zkracovány na přesně požadované délky, pokud jsou stěny kratší než kupovaný polotovár, je tento krok vynechán. Tímto je dokončena příprava trubek včetně úkosů, dalším krokem je příprava pásků, které jsou připravovány ze svitků. Po nastříhání potřebných délek jsou pásy zkalibrovány a komponenty pro membránovou stěnu jsou kompletní. Jejich svařování je na obrázku 42. Metoda svařování musí být spolehlivá a kvalitní. Nejvhodnější metodou pro tyto účely je svařování pod tavidlem, které je rychlé a poloha PB je dostačující. Posouvání trubek a pásků je uskutečněno tvarovými kladkami a dále pokračují na válečkové dopravníky. Stěna je poté otočena a svar proveden i z druhé strany. Pokud je nutné pro daný materiál tepelné zpracování musí být uskutečněno po svařování případně i před. Všechny svary prochází rentgenem a vizuální kontrolou 100 %. Nalezené defekty jsou odstraněny a opraveny, poté opět zkontrolovány.



Obr. 42 Svařování membránových stěn [53]

Pro další postupy jsou stěny rozděleny podle toho, jestli výsledný produkt má být navařovaný materiálem odolávajícím vysokoteplotní korozi nebo bez návaru. V případě stanovení konstruktérem, že membránová stěna bude bez návaru, je možné ji ohýbat a vytvářet různě zakřivené tvary, bez svařování. Poté jsou přivařeny různé komponenty potřebné pro provoz kotle a následně jsou panely sjednoceny na místě, kde má být kotel postaven. Materiály, ze kterých jsou vyráběny membránové stěny byly postupně vymyšleny novější a novější, některé základní jsou v tabulce 6. Pro zvyšování účinnosti elektráren musí být zvyšována i teplota a tlak uvnitř trubek, to jejich rozvoj dále rozšiřuje.

Tabulka 6 Výběr materiálů používaných pro membránové stěny [54] [55]

| Materiály membránových stěn a jejich chemické složení |             |             |                 |               |                 |     |               |
|---|-------------|-------------|-----------------|---------------|-----------------|-----|---------------|
| [%]   | 16Mo3       | 13CrMo4-5   | 7CrMoVTiB 10-10 | VM12-SHC      | X10CrWMoVNB 9-2 | [%] | Alloy 617     |
| C   | 0,12 - 0,2  | 0,10 - 0,17 | 0,05 - 0,1      | 0,10 - 0,14   | 0,07 - 0,13     | C   | 0,05 - 0,08   |
| Si  | max 0,35    | max 0,35    | 0,15 - 0,45     | 0,40 - 0,60   | max 0,50        | Si  | max 0,30      |
| Mn  | 0,40 - 0,90 | 0,40 - 0,70 | 0,30 - 0,70     | 0,15 - 0,45   | 0,30 - 0,60     | Mn  | max 0,30      |
| P   | max 0,025   | max 0,025   | max 0,020       | max 0,020     | max 0,020       | P   | max 0,012     |
| S   | max 0,01    | max 0,020   | max 0,010       | max 0,010     | max 0,010       | S   | max 0,008     |
| Al  | -           | max 0,040   | max 0,020       | max 0,020     | max 0,040       | Al  | 0,80 - 1,30   |
| Cr  | max 0,3     | 0,7 - 1,15  | 2,20 - 2,60     | 11,0 - 12,0   | 8,50 - 9,50     | Cr  | 21,0 - 23,0   |
| Ni  | max 0,3     | max 0,3     | -               | 0,10 - 0,40   | max 0,40        | Ni  | zbytek        |
| Mo  | 0,25 - 0,35 | 0,40 - 0,60 | 0,90 - 1,10     | 0,20 - 0,40   | 0,30 - 0,60     | Mo  | 8,0 - 10,0    |
| V   | -           | -           | 0,20 - 0,30     | 0,20 - 0,30   | 0,15 - 0,25     | V   | -             |
| Nb  | -           | -           | -               | 0,03 - 0,06   | 0,40 - 0,90     | Nb  | -             |
| Ti  | -           | -           | 0,05 - 0,10     | -             | -               | Ti  | 0,30 - 0,50   |
| W   | -           | -           | -               | 1,30 - 1,70   | 1,50 - 2,00     | Fe  | max 1,5       |
| N   | max 0,012   | -           | max 0,01        | 0,03 - 0,07   | 0,03 - 0,07     | N   | max 0,05      |
| B   | -           | -           | 0,0015 - 0,0070 | 0,003 - 0,006 | 0,001 - 0,006   | B   | 0,002 - 0,005 |
| Co  | -           | -           | -               | 1,40 - 1,80   | -               | Co  | 11,0 - 13,0   |
| Cu  | max 0,3     | -           | -               | -             | -               | Cu  | max 0,05      |

V případě zvolení návarové vrstvy, je nutné mít kotel, pokud možno bez ohybů, protože návar musí být v co největší míře prováděn automatizovaně. Ruční návary jsou pouze pro dokončování, protože člověk není schopen vytvořit tak rovnoměrnou navařovanou vrstvu bez vad. Navařovaný materiál je téměř vždy na bázi niklu (obr. 43). Tato aplikace není vůbec jednoduchá a mnoho metod navařování nedokáže vytvořit potřebnou jakost návarové vrstvy. Z důvodu automatizace je nejvýhodnější metoda TIG, MIG/MAG. Nejlepší návar byl v minulosti prováděn pouze metodou TIG, ale s rozvojem elektroniky pro vyšší automatizaci řízení přenosu kovu při metodách tavících se elektrod začala být používána i metoda MIG/MAG.

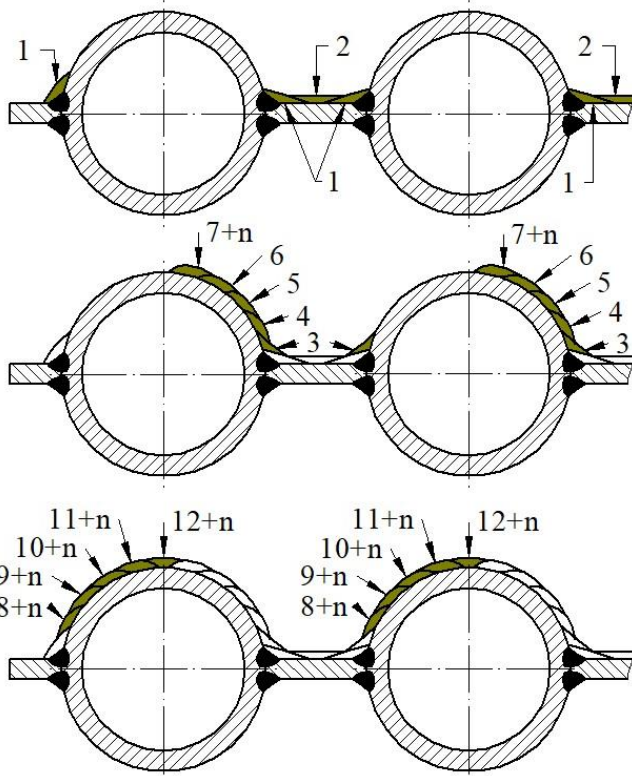


Obr. 43 Návar Inconelem 625 [45]



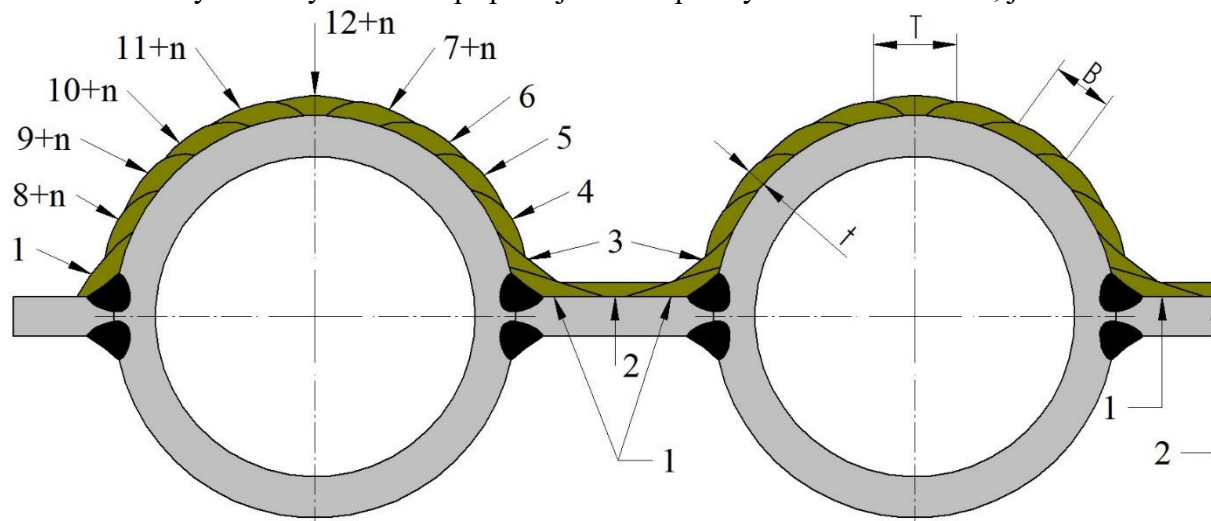
Modifikace CMT se pro navařování těchto typů materiálů obzvláště hodí, protože do procesu vnáší pouze velice malé množství tepla.

Pro co nejlepší vrstvu bez vad jsou nejdůležitější tři fáze. V první fázi se musí sestavit zařízení schopné splnit veškeré kinematické a dynamické požadavky pro kladení housenek a zároveň musí být elektronicky vybaveno pro řízení svařovacího zařízení a identifikace potřebných bodů pro vykreslování trajektorie. Ve druhé fázi je potřeba navrhnout způsob kladení jednotlivých návarových vrstev a zajistit variabilitu pro různé rozměry membránových stěn. Návrh, jak uspořádat návary je mnoho. Jedna z možných variant je na obrázku 44, který ukazuje postup, jak jednotlivé vrstvy přibývají. Návrh trajektorie je jeden z nejdůležitějších kroků, protože po zvolení nejvhodnějšího návrhu musí být vytvořen algoritmus, který vždy zahrne rozměry trubek, pásek a svarů z výroby samotného panelu. První návarové vrstvy jsou vytvořeny ve styku mezi páskem a trubicí, pro oporu dalších vrstev. Další vrstva je přímo mezi vzniklými návary. Následující vrstva je označena číslem 3 a je umístěna na trubku a první návar. Ze strany, kde je poslední pásek tato vrstva není. Následuje několik vrstev téměř až k vrcholu trubky. Poté je symetricky z druhé strany provedena řada návarů a zakončena posledním návarem nahoře. Výsledný návar je ukázán na obrázku 45. Některé algoritmy mohou v případě, kdy nevychází vhodný počet návarů na trubce, mít na vrchu vrstvu umístěnou nesymetricky. V tomto případě je vrstva překryta dalším návarem, jako u ostatních.



Obr. 44 Postup navařování [vlastní tvorba]

Následuje několik vrstev téměř až k vrcholu trubky. Poté je symetricky z druhé strany provedena řada návarů a zakončena posledním návarem nahoře. Výsledný návar je ukázán na obrázku 45. Některé algoritmy mohou v případě, kdy nevychází vhodný počet návarů na trubce, mít na vrchu vrstvu umístěnou nesymetricky. V tomto případě je vrstva překryta dalším návarem, jako u ostatních.



Obr. 45 Postup se základními rozměry návaru [45]

Poslední fázi, se kterou je možné tyto tři výzkumy sjednotit a vytvořit celé zařízení je nastavení vhodných navařovacích parametrů, které ovlivňují promísení a geometrii návaru.

### 4.3 Experiment [32] [56]

Výzkum je zaměřen na stanovení optimálních procesních parametrů navařování Inconelem 625 a zkoumání vhodnosti použití pro následné kladení housenek s myšlenkou docílit co nejvíce ekonomického procesu při dodržení předepsané kvality.

Před zahájením projektu byly vyzkoušeny technologie MAG - CMT se zdrojem Fronius a klasické navařování MAG se zdrojem od společnosti EWM. Pokus byl proveden na vodou chlazených membránových stěnách a svařování probíhalo ručně a automatizovaně. Nejdůležitějším faktorem pro rozhodnutí, jakou metodou bude vhodné navařovat, bylo měření množství železa na povrchu návarové vrstvy. U klasické metody se zdrojem EWM bylo dosaženo 5,45 % Fe pro ruční navařování a 4,3 % pro robotizované. U metody CMT bylo pro ruční navařování dosaženo hodnoty 1,9 % a pro automatizované 1,35 %.

S ohledem na nižší promísení je zvolena metoda MAG - CMT. Svařovací zdroj je použit Fronius TPS 500i. Parametry zdroje jsou v tabulce 7.

Tabulka 7 Základní parametry zdroje TPS 500i [57]

|                              |   |   |             |
|------------------------------|---|---|-------------|
| Síťové napětí                | 3 x 400 V                                 | Max. emise hluku (LWA)                        | 74 dB (A)   |
| Svař. proud při 10 min/40 °C | 40 %/500 A;<br>60 %/430 A;<br>100 %/360 A | Spotřeba energie v kl. stavu při 400 V        | 34,1 W      |
| Max. ef. primární proud      | 23,7 A                                    | Úč. zdroje pr. při 500 A/ 40 V                | 89 %        |
| Max. primární proud          | 37,5 A                                    | Rozsah svařovacího proudu (I2)                |             |
| Síťové jištění               | 35 A, zp. typ                             | MIG/MAG                                       | 3-500 A     |
| Tolerance síť. napětí        | +/- 15 %                                  | TIG   | 3-500 A     |
| Frekvence sítě               | 50/60 Hz                                  | Obalená elektroda                             | 10-500 A    |
| Napětí naprázdno             | 71 V                                      | Rozsah výst. nap. podle norm. charakter. (U2) |             |
| Druh chlazení                | AF  | MIG/MAG                                       | 14,2-39,0 V |
| Rozměry d x š x v            | 706 x 300 x 510                           | TIG   | 10,1-30,0 V |
| Hmotnost                     | 38 kg                                     | Obalená elektroda                             | 20,4-40 V   |

Použitý hořák pro CMT dosahuje frekvence kmitání drátu až 90 Hz. Přídavný materiál je vybrán AX - 625 jehož chemické složení je v tabulce 8. Průměr drátu činí 1,2 mm a celá cívka váží 15,2 kg.

Tabulka 8 Chemické složení přídavného materiálu od firmy ALUNOX [58]

| Prvek   | Ni     | C    | Cr | Mo  | Mn  | Si  | Nb+Ta | Fe  |
|---------|--------|------|----|-----|-----|-----|-------|-----|
| Hmot. % | zbytek | 0,02 | 22 | 9,0 | 0,2 | 0,2 | 3,3   | 1,5 |

Pro tento materiál je doporučena směs plynů, která obsahuje argon, helium, vodík a oxid uhličitý. Plyn je vybrán od firmy Linde Cronigon Ni10, jehož chemické složení je v tabulce 9.

Tabulka 9 Chemické složení ochranného plynu [59]

| Argon [%] | Helium [%] | Vodík [%] | Oxid uhličitý [%] |
|-----------|------------|-----------|-------------------|
| 67,945    | 30,0       | 2,0       | 0,055             |

Díky nepatnému množství CO<sub>2</sub> je plyn považován za aktivní. I takto malé množství zvyšuje stabilitu oblouku. Helium je ve směsi pro zvýšení smáčivosti. Vodík zvyšuje smáčivost a tekutost svarového kovu, ale může mít i nepříznivý vliv na tažnost. Navařovaným dílem je plech o tloušťce 6 mm z oceli 16Mo3. Pro zajištění vodního chlazení je k plechu přivařen



tvarový dílec, s nímž dohromady tvoří nádobu o objemu přibližně 25 l. Tento objem je zcela dostačující a případné zvýšení teploty vody je hlídáno.

Navarování je plně automatizováno za pomoci manipulátoru s upnutým dílcem a robotem KUKA KR5. Na obrázku 46 je vidět robot i manipulátor s navařovaným tělesem. Obě zařízení jsou řízena pomocí ovladače, se kterým jsou propojeny kabely. Ovladač umožňuje psaní NC kódů. Ovládání zdroje je řízeno samostatně pomocí počítače. Je tedy nutné spouštění procesu pomocí dvou zařízení současně, což není optimální, ale je tím usnadněno zapojení všech systémů. Na obrázku je také vidět svařovací zdroj a hořák umístěný na konci robota. Zařízení musí být také vybaveno absorbčním členem pro posuv drátu, který je na obrázku 47. Na tomto obrázku je také ukázáno podávací zařízení se zakrytou cívkou navařovacího drátu. Zdroj je vybaven dotykovým displejem a má různé režimy pro řízení procesu. Firma Fronius vyvíjí synergické režimy pro nespočet různých aplikací. Každá synergická křivka má jiné vlastnosti. Pro volbu je důležitý druh použití, protože se zdrojem je možné svařovat, navařovat nebo pájet. Dalším faktorem pro volbu synergie je používaný materiál, případně použitý plyn. Všechny je možné stáhnout na stránkách Fronius a přes počítač nahrát do systému svařovacího zdroje. Synergický režim je obecně řízení procesu svařování pouze přes nastavení několika základních parametrů. Všechny parametry jsou vzájemně propojeny tak, aby byl oblouk co nejstabilnější a konkrétní výsledek, pro který je synergie naprogramována, byl co nejlepší. Při výzkumu je pozorován oblouk vysokorychlostní kamerou a postupně je zvyšována rychlost posuvu drátu. Pro každou rychlost jsou nastaveny ostatní parametry pro ideální přenos.



Obr. 47 Svařovací robot Kuka s manipulátorem [vl. tvorba]



Obr. 46 Svařovací zařízení [vlastní tvorba]

#### 4.3.1 Metodika navařování [32]

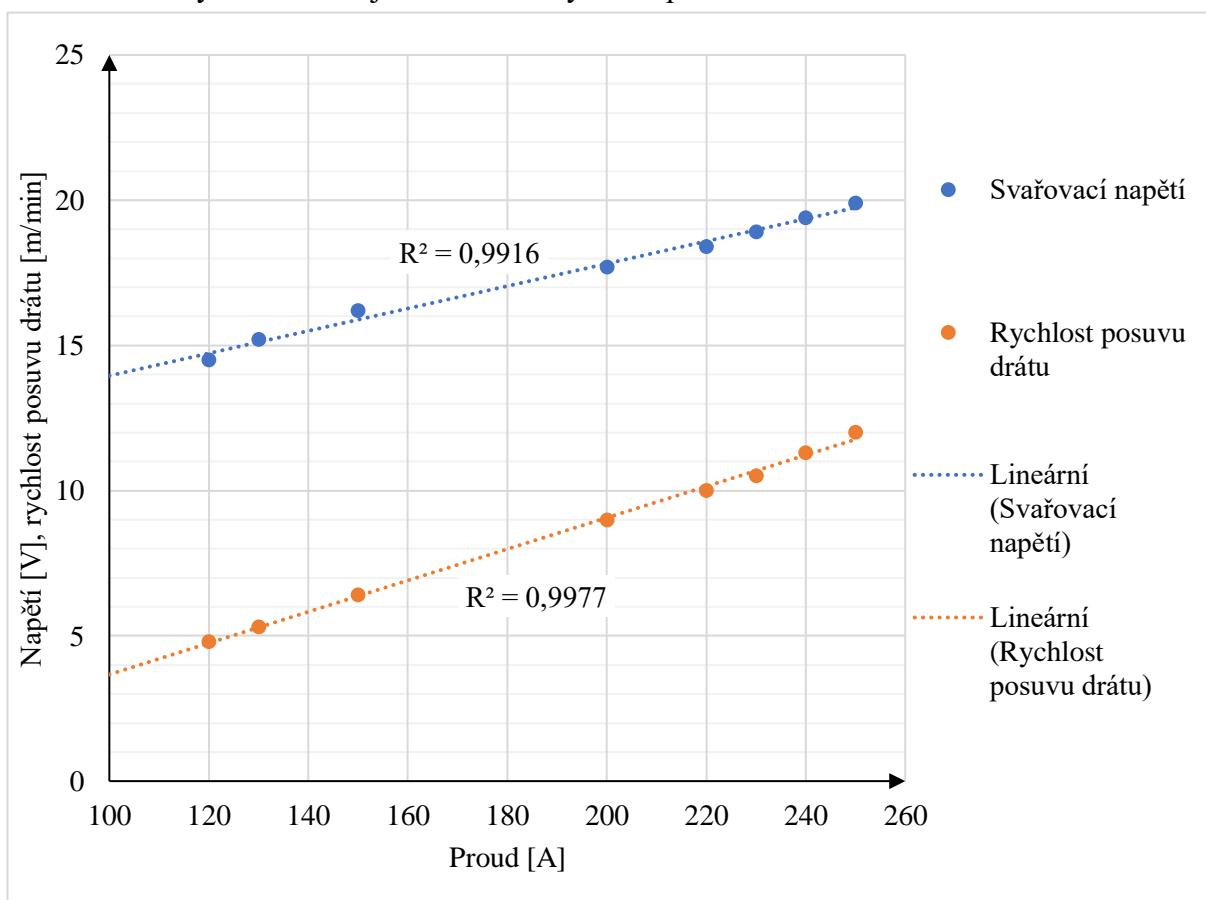
Křivka synergie je vybrána 3921 ve verzi 2.3.1 podle použití (navarování), přídavného materiálu, plynu, průměru drátu a funkce CMT.

Na obrázku 48 je graf, který ukazuje pro několik zvolených proudů přepočítané napětí pro tuto synergii. Existuje určité rozmezí, ve kterém je oblouk stále stabilní a mění se jím geometrie návaru. Pro tyto změny jsou vytvořeny funkce korekce délky oblouku a korekce pulzní dynamiky, to umožní nezasahovat do výzkumem vytvořené křivky od firmy Fronius.

Korekce délky oblouku (KDO) je řízena hodnotami od -10 do +10. Při změně od původní 0 do kladných hodnot, je zkrácen čas, kdy je drát ve fázi vracení zpět do hořáku. Rychlost pohybu je stejná a dojde tedy ke zmenšení vzdálenosti konce drátu od základního materiálu neboli snížení délky oblouku. Protože se zkrátí čas, dojde ke zvýšení frekvence přenosu kovu. Kratší vzdálenost snižuje napětí a tepelný příkon. Při nastavení záporných hodnot je čas návratu naopak prodloužen a tím je zvětšena délka oblouku, následkem toho je zvětšeno napětí a také ztráty energie. Natavovaná kapička kovu je větší a frekvence menší. Tvar návaru je širší.

Korekce pulzní dynamiky (KPD) je nastavitelná od -10 do +10. V obvodu simuluje indukčnost. A řídí velikost zkratového proudu. Při záporných hodnotách je proud zvyšován a při kladných snižován. Důsledkem snížení proudu je méně stabilnější oblouk, ale menší rozstřík a promísení. Při zvýšení zkratového proudu dojde k vyššímu promísení, k lepší stabilitě oblouku a zvyšuje se kontaktní úhel mezi návarem a základním materiálem.

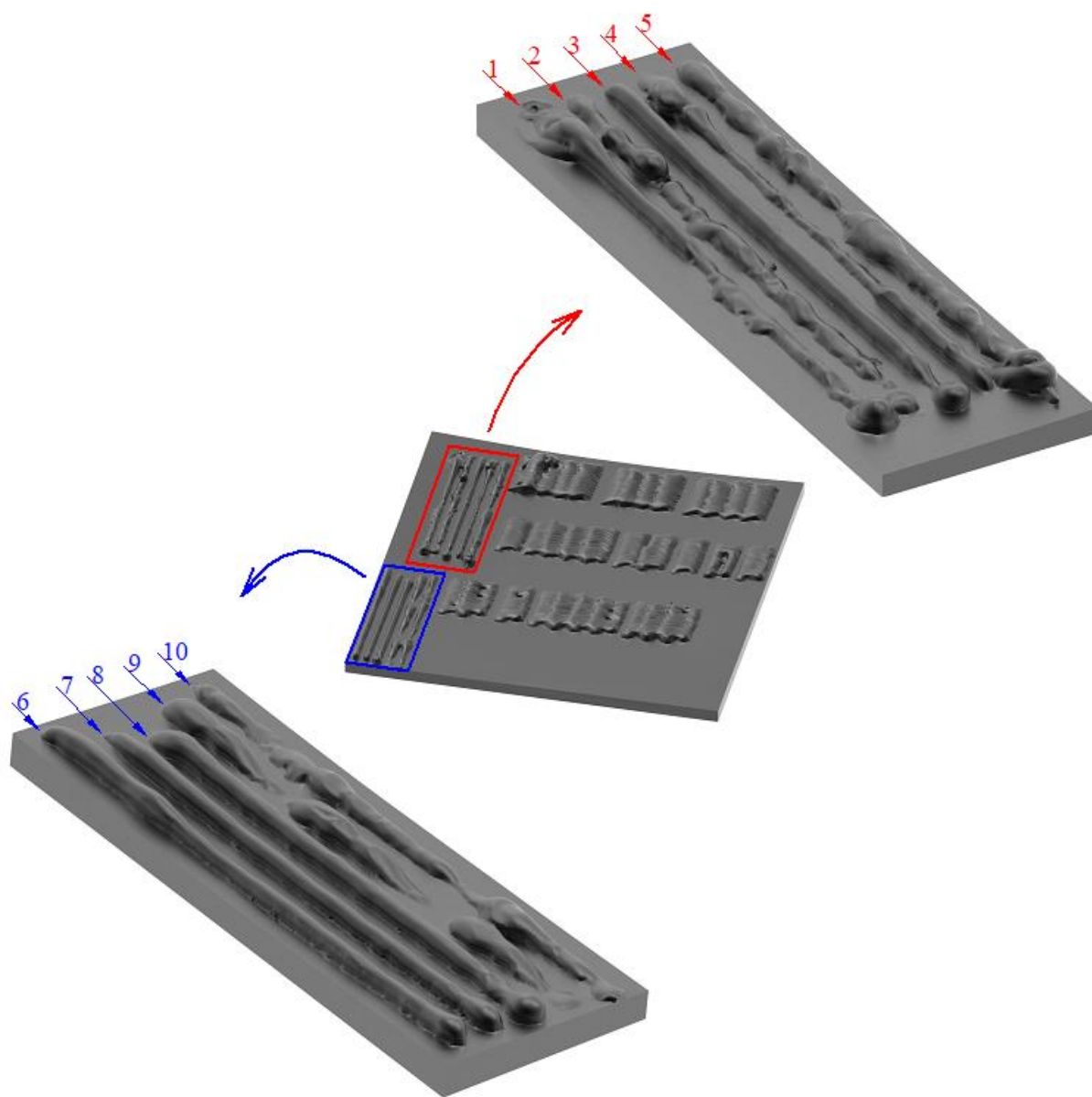
Rychlost posuvu drátu je matematicky synergií vázána na proud a napětí. U metody CMT není rychlost konstantní jako u konvenčních metod. Proces je řízen digitálně a zařízení jej samo reguluje v každém okamžiku při nevyhovujících parametrech. Korekce pulzní dynamiky a korekce délky oblouku mají také vliv na rychlost posuvu drátu.



Obr. 48 synergie 3921 [vlaství tvorba]

Při zahájení experimentu bylo nutné promyslet, jaké výsledky budou vyžadovány. Základními požadavky jsou co nejvíce hladké přechody mezi jednotlivými návary, z praxe je ověřeno, že s rostoucí nerovností přechodů, návar více podléhá korozi. Další stanovenou hodnotou je tloušťka vrstvy, která má být minimálně 2 mm, ne však příliš mnoho, kvůli ceně přídavného materiálu. Optimální vrstva by se tedy měla pohybovat od 2 do 3 mm. Posledním požadavkem je návar bez jakýchkoliv defektů a s nízkým rozstříkem.

V první fázi je cílem vytvořit jednoduchý přímý návar s vhodnou geometrií a stabilitou. Na obrázku 49 je zobrazena deska, na které byly návary provedeny. Všechny návary byly vytvořeny v poloze PG. První byly bez rozkvyu. Myšlenka byla taková, že pokud půjde vytvořit celistvá plocha z několika návarů bez rozkvyu, bude to do procesu vnášet velice malé množství tepla a kladení jednotlivých vrstev a programování bude o mnoho jednodušší. První návary jsou očíslovány od 1 do 5 červenou barvou. Dalších 5 návarů bez rozkvyu je modrou barvou a jsou označeny čísly 6 až 10.



Obr. 49 Označení návarů bez rozkvyu [vl. tvorba]

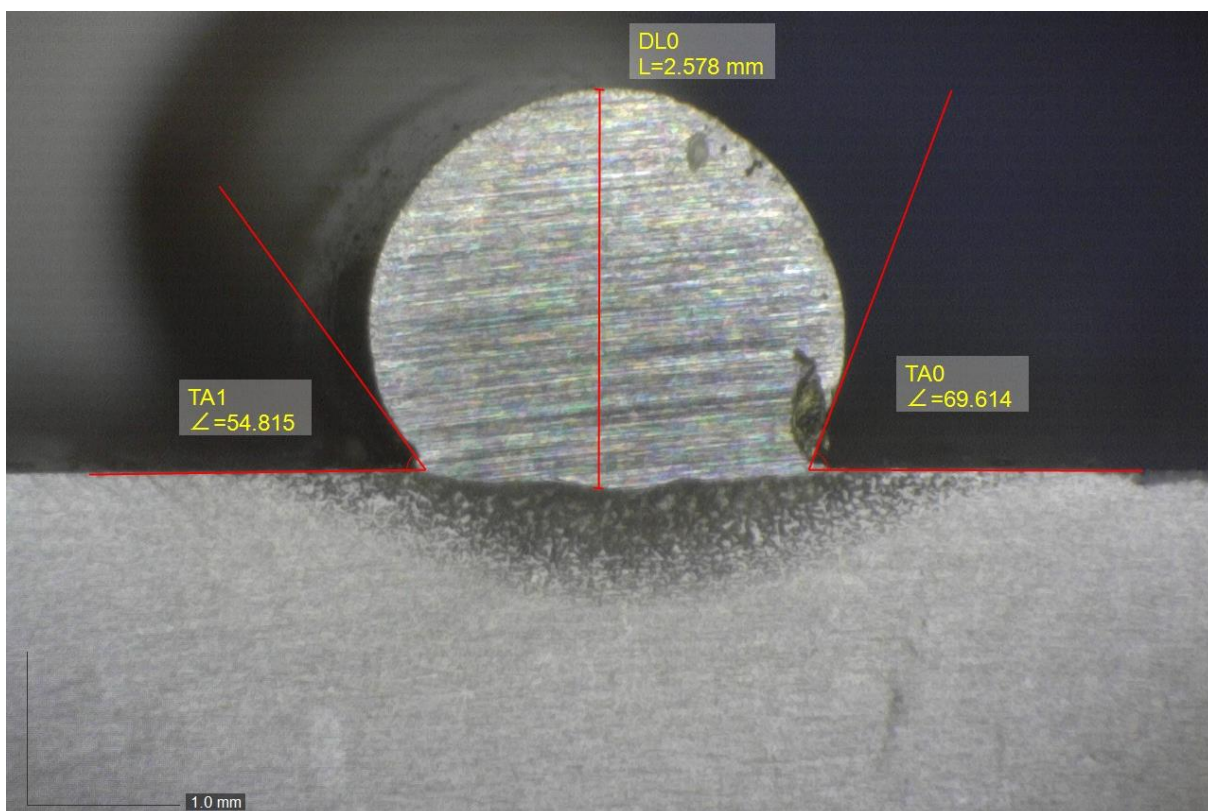


#### 4.3.2 Návary bez rozkyvu

Prvních 5 pozic bylo určeno pro zkušební návary. Je na nich vidět značná nepravidelnost. V modře označeném bloku byla snaha dosáhnout návarů, které by bylo možné klást vedle sebe, čímž by byla vytvořena celistvá návarová vrstva. Postupně byl zvyšován proud, protože pro navázání je důležité vytvořit kontaktní úhel okolo  $130^\circ$ . Parametry pro druhý blok, tedy pro návary 6, 7, 8, 9 a 10 jsou zaznamenány v tabulce 10. Návary 9 a 10 byly nastavené na 160 A. Proud byl pro svařovací rychlost 600 mm/s a polohu PG příliš vysoký a svarová lázeň začala odkapávat, což vytvářelo přerušení. Pravidelné návary jsou 6, 7 a 8. Na obrázku 50 je makrostruktura návaru 6. Makrostruktury návaru 7 a 8 jsou v příloze 1, kde jsou taktéž zaznamenány úhly a výška návaru.

Tabulka 10 Parametry návarů 6 až 10 bez rozkyvu [vl. tvorba]

| Návar                           | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| Svařovací proud [A]             | 120  | 120  | 140  | 160  | 160  |
| Svařovací napětí [V]            | 14,5 | 14,5 | 15,8 | 16,6 | 16,6 |
| Rychlost podávání drátu [m/min] | 4,8  | 4,8  | 5,8  | 6,9  | 6,9  |
| Svařovací rychlost [mm/min]     | 600  | 600  | 600  | 600  | 600  |
| Korekce pulzní dynamiky         | 5,7  | 5,7  | 5,7  | 5,7  | 5,7  |
| Korekce délky oblouku           | 0    | 0    | 0    | 0    | -5   |

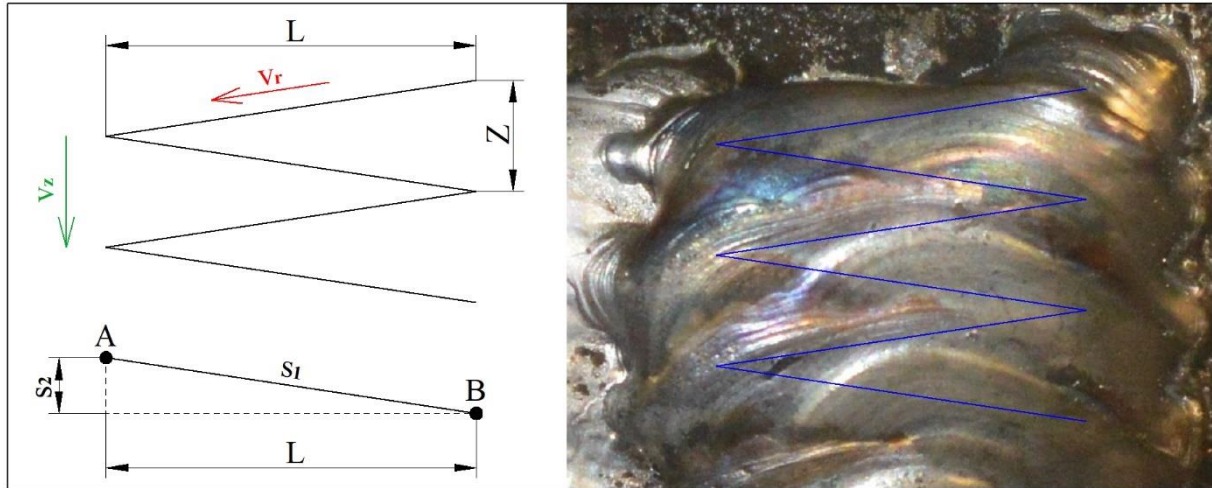


Obr. 50 Makrostruktura návaru 6 [vl. tvorba]

Kontaktní úhly návarů 6, 7 a 8 jsou menší než požadovaných  $130^\circ$  dokonce jsou menší i než  $90^\circ$ , tudíž je nereálné navázat návary na sebe, docházelo by k přeskokování oblouku mezi základním materiálem a již vytvořeným návarem. Při zvýšení proudu nebo snížení pulzní dynamiky by mohlo být docíleno lepších úhlů, ale zapříčinilo by to vysoké zředění. Z těchto znalostí bylo rozhodnuto, že návary budou muset být prováděny s rozkyvem.

#### 4.3.3 Návary s rozkyvem [60]

V první řadě je nutné určit, jak bude rozkyv nastaven. Na obrázku 51 je znázorněna trajektorie pohybu hořáku. Pro nastavení robota jsou zadávány pomocí souřadnic vzdálenosti  $L$ ,  $Z$  a rychlost  $v_r$ , která je zadávána v metrech za sekundu. Pro svařování je nutné rychlost přepočítat na svislou osu.



Obr. 51 Rozkyv [vl. tvorba]

Výpočet vychází z myšlenky že čas, který urazí hořák z bodu A do bodu B je stejný pro vzdálenosti označené  $s_1$  a  $s_2$ .

$$s_2 = \frac{Z}{2} \quad (4.1)$$

kde:  $S_2$  je polovina vzdálenosti periody rozkyvu [mm],  
 $Z$  je vzdálenost periody rozkyvu [mm].

$$s_1 = \sqrt{L^2 + s_2^2} = \sqrt{L^2 + \frac{Z^2}{4}} \quad (4.2)$$

kde:  $s_1$  je dráha mezi body A a B [mm],  
 $L$  je šířka rozkyvu [mm].

$$t = \frac{s_1}{v_r} = \frac{\sqrt{L^2 + \frac{Z^2}{4}}}{v_r} \quad (4.3)$$

kde:  $t$  je čas [s],  
 $v_r$  je rychlost zadávaná pro robota [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$$t = \frac{s_2}{v_z} = \frac{\frac{Z}{2}}{v_z} = \frac{Z}{2 \cdot v_z} \quad (4.4)$$

kde:  $v_z$  je rychlost v ose svařování [ $m \cdot s^{-1}$ ].



Dosazením rovnice 4.3 do 4.4 a vyjádřením  $v_z$  dostáváme rovnici:

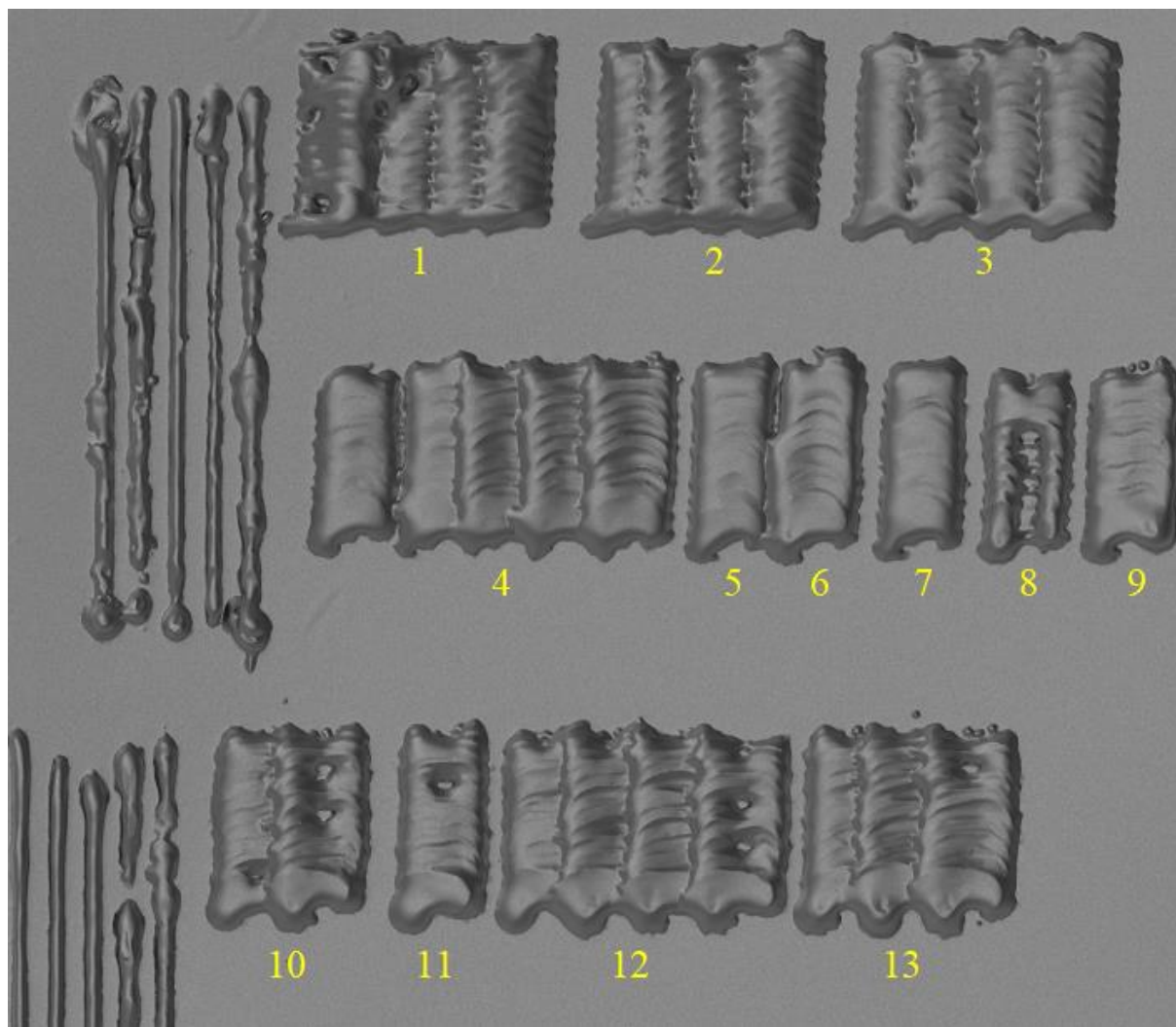
$$v_z = \frac{v_r \cdot Z}{2 \cdot \sqrt{L^2 + \frac{Z^2}{4}}} \quad (4.5)$$

Pro svařování není obvyklé používání jednotky metr za sekundu pro svařovací rychlost, ale robot je v těchto základních jednotkách nastavován, proto je vzorec upraven následovně:

$$v_z = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot v_r \cdot Z}{\sqrt{L^2 + \frac{Z^2}{4}}} \quad (4.6)$$

kde:  $v_z$  je svařovací rychlost [ $mm \cdot min^{-1}$ ].

Pro všechny návary byl zvolen rozkvyv o šířce 10 mm a vzdáleností periody rozkvyvu 3 mm. Na obrázku 52 je označení návarů. Při navařování s rozkvyvem bylo zkoumáno také překrývání housenek, což do procesu přinášelo další nastavitelné možnosti ohledně vzdálenosti středů návarů.

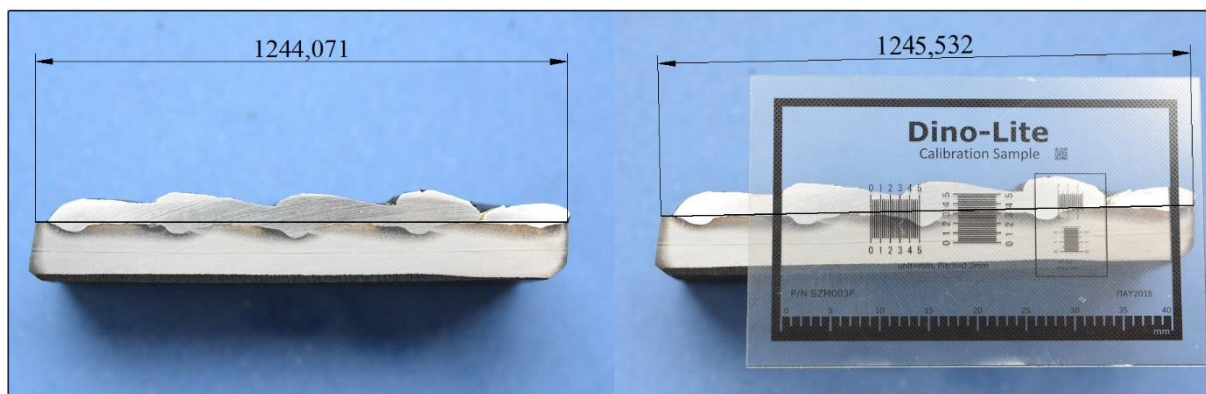


Obr. 52 Označení návarů s rozkvyvem [vl. tvorba]

Po zhotovení návarů byly provedeny řezy pro pozorování makrostruktury a rozměrů. Pro velké řezy byl použit plazmový řezák a jednotlivé pozorovací vzorky byly dále děleny na metalografické pile, která je na obrázku 53. Pila vytváří velice kvalitní povrch a brusné kotouče mohou začínat od vysoké zrnitosti. Brusné papíry byly zvoleny 180, 400 a 600. Leptadlo bylo vybráno podle základního materiálu nital (kyselina dusičná na alkoholové bázi). Pro návary bez rozkvyvu byl použit mikroskop a pozorovaný objekt zvětšen 50x. Mikroskop je zkalibrován a není žádný problém při měření délkových nebo plošných veličin. U vzorků s rozkvyvem, bylo zjištěno, že je nelze zachytit při nejmenším nastaveném zvětšení mikroskopu celé. Z tohoto důvodu byl použit fotoaparát s makro objektivem. Pro měřítko byl využit etalon ve formě průhledné plastové destičky. Ukázka fotky s etalonem a bez etalonu je na obrázku 54. Etalon je velice tenký a při zaostření na pozorovaný objekt je vzdálenost fotoaparátu od vzorku stejná a měřítko lze použít. Fotky byly přeneseny do programu Solid Edge, ve kterém bylo měřítko přepočítáváno. U délkových rozměrů byly pomocí měřítka hodnoty přepočítány na skutečné. Pro měření plochy nastal problém, protože v programu nelze určovat jiná měřítka pro výpočty ploch, než jsou standardizována. Určení ploch je důležité pro výpočet zředění (vzorec 2.1). Zředění je však bezrozměrná veličina, a tudíž pokud je měřítko pro obě plochy stejné, byť neznámé, pro výsledek je to zcela nepodstatné. V tabulce bude pro plochy uvedeno, že se jedná o rozměr bez měřítka. Úhly nejsou na měřítko vázány, ale protože se jedná o skutečnou hodnotu jsou uvedeny v tabulce společně s délkovými rozměry v kolonce s měřítkem.



Obr. 54 Metal. pila [vl. tvorba]



Obr. 53 Ukázka fotek s etalonem a bez etalonu [vl. tvorba]

Na obrázku je úsečka z jedné hrany vzorku k druhé pro oba snímky. Úsečky jsou vytvořeny a zakótovány v programu Solid Edge. Pro výpočet nezáleží na pootočení vzorku, důležité je držení pohledu shora. Pro ukázkou přesnosti je proveden výpočet odchylek vzdáleností.

$$\Delta u = \left(1 - \frac{1244,071}{1245,532}\right) \cdot 100 = 0,12 \%$$

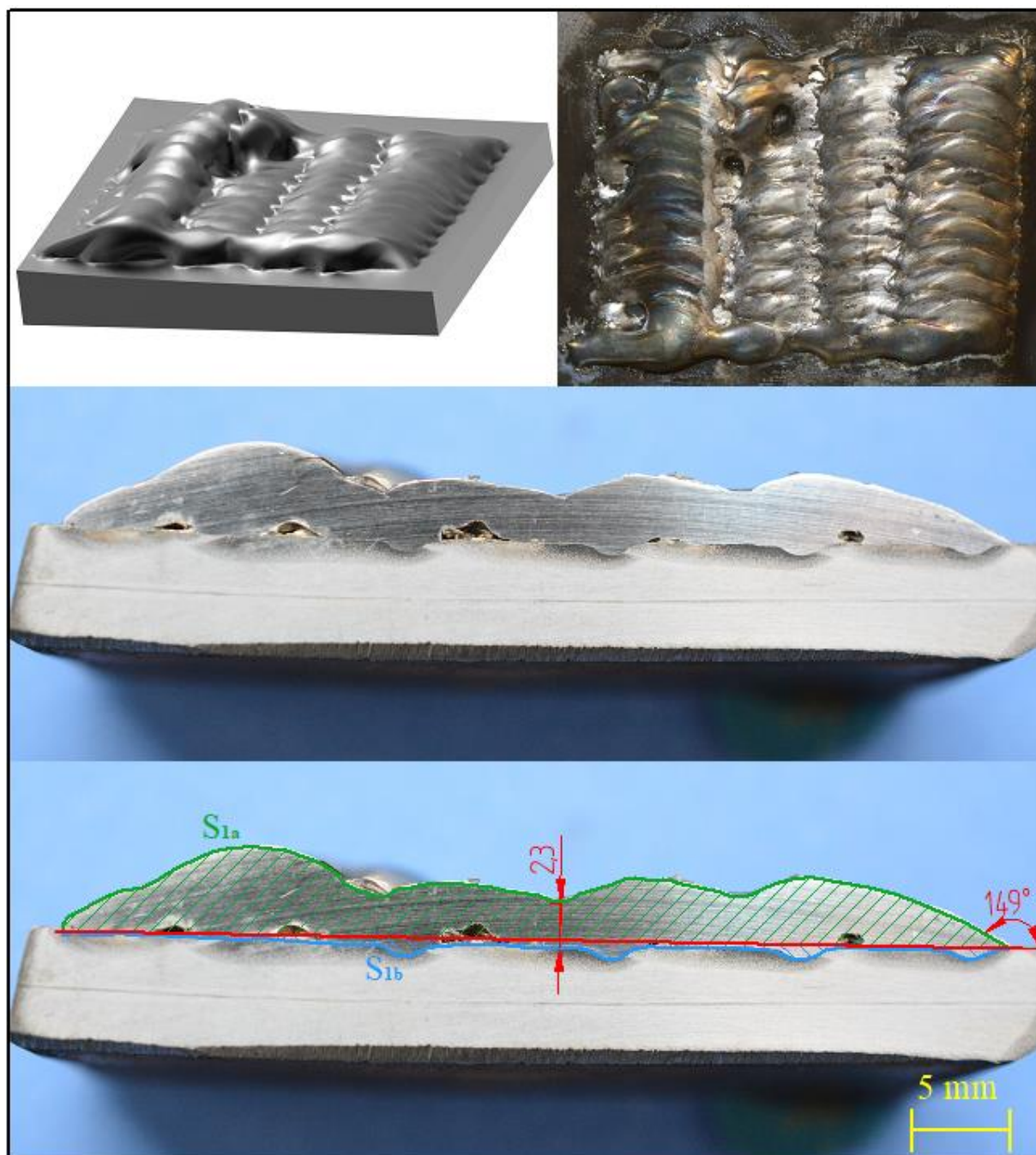
kde:  $\Delta u$  je odchylka délek [%].

Z výpočtu je patrné, že při dodržení stejné ostrosti snímků je přesnost velice dobrá, především s uvážením, že je s pomocí měřítka je určována výška návaru, která je předepsána v rozmezí od 2 do 3 mm.

V tabulce 11 jsou parametry návaru číslo 1 a na obrázku 55 je zobrazen. Osová vzdálenost jednotlivých vrstev byla měněna, protože na počátku nebylo zcela jasné, jak se bude překrývání chovat. Druhý návar byl osově vzdálen o 50 % šířky a poté se vzdálenost zvětšila na 9 mm.

Tabulka 11 Parametry návaru 1 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO               | Os. vzd. [mm] | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------|
| 1      | 120              | 14,5  | 4,8                                | 0,02                       | 178                           | 5,7               | 0,5               | -             | 13         |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |                   |               |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] | Výška návaru [mm] |               |            |
| 1      | 109205           |       | 14372                              |                            | 11,6                          | 149               | 2,3               |               |            |



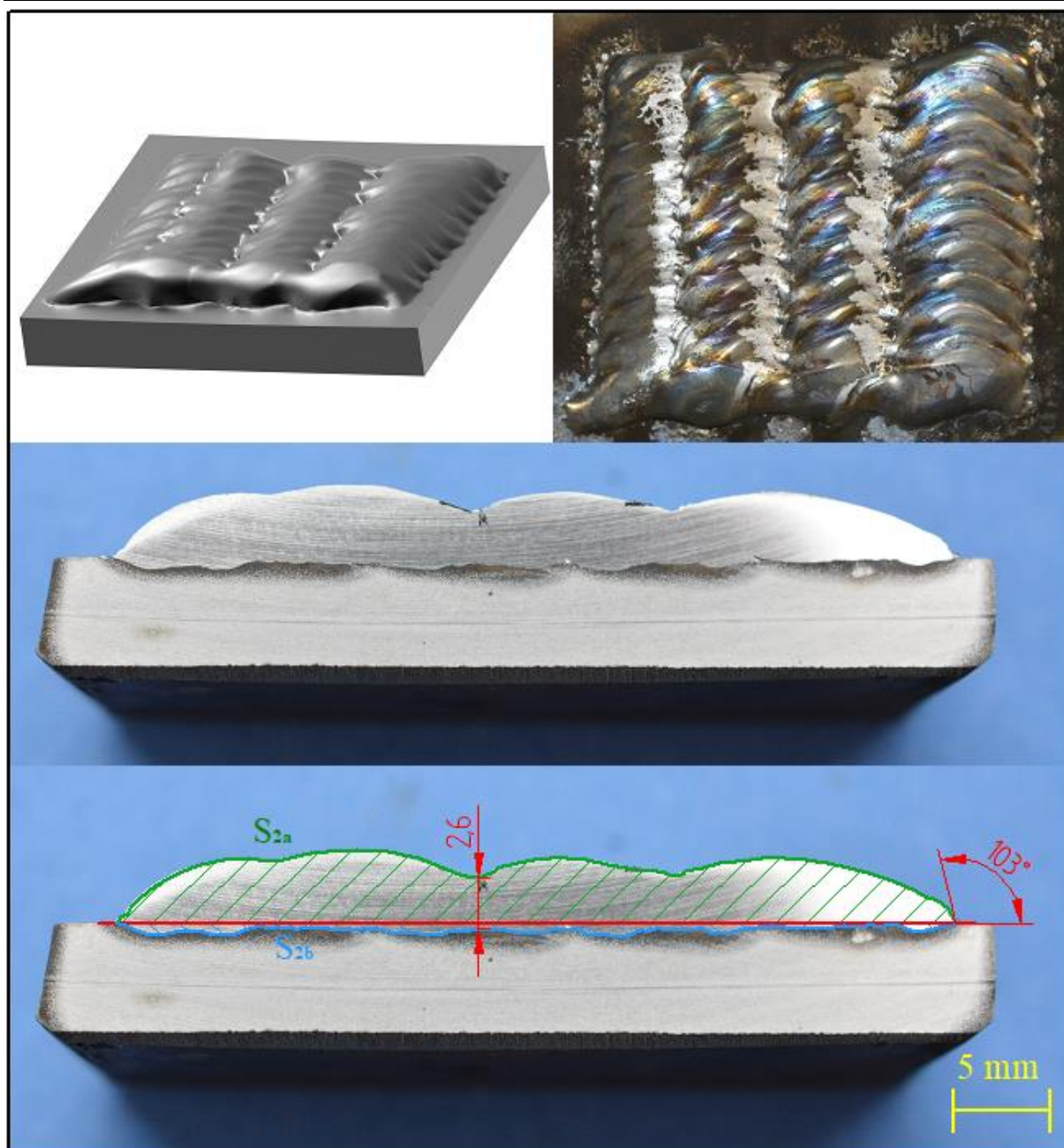
Obr. 55 návar 1 s rozkyvem [vl. tvorba]



V tabulce 12 jsou parametry návaru 2 a na obrázku 56 je vyobrazen. Proud byl postupně zvyšován a bylo pozorováno, jak se mění geometrie návaru. Z hlediska ekonomiky je výhodné mít proud nastavený co nejvyšší, protože tím je přes synergii zvyšována i rychlost podávání drátu, a tudíž je navařeno větší množství materiálu za jednotku času.

Tabulka 12 Parametry návaru 2 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO | Os. vzd. [mm]     | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-----|-------------------|------------|
| 2      | 130              | 15,2  | 5,3                                | 0,02                       | 178                           | 5,7               | 0,5 | 10                | 11,4       |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |     |                   |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] |     | Výška návaru [mm] |            |
| 2      | 97245            |       | 11587                              |                            | 10,6                          | 103               |     | 2,6               |            |

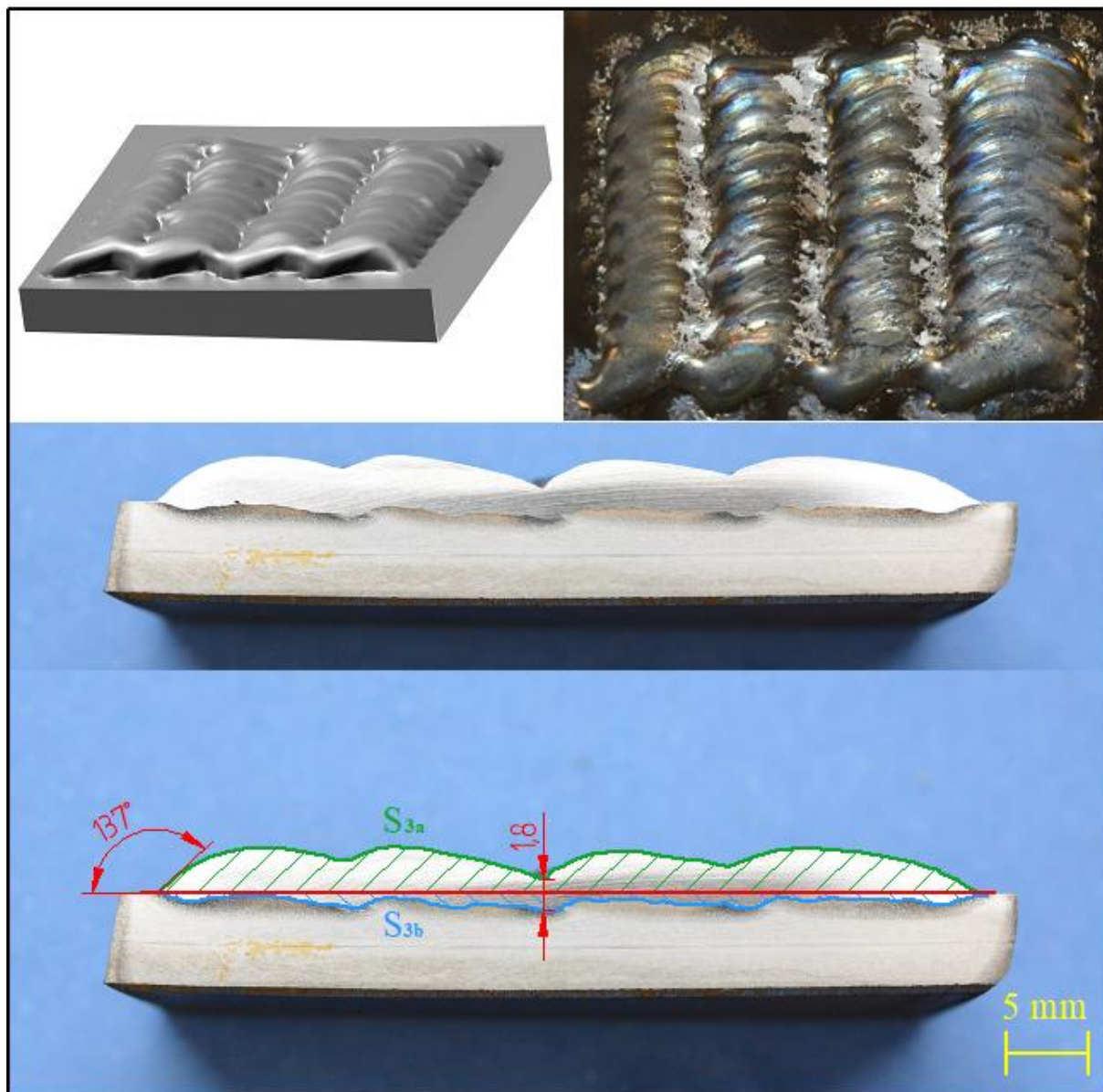


Obr. 56 Návar 2 s rozkyvem [vl. tvorba]

Návar 3 je na obrázku 57 a jeho parametry jsou v tabulce 13. U pokusu 3 byl proud navýšen na 150 A a zároveň byla zvýšena svařovací rychlost. Na povrchu je vidět, že šupinkovitá kresba je se zvyšujícím se proudem postupně méně výrazná. Na makrostruktuře je vidět propad výšky při navařování, jinak je vrstva povedená. Propad by mohl být eliminován nepatrným přiblížením osových vzdáleností jednotlivých návarů, ale rychlost navařování je pořád nízká. Při zvýšení rychlosti bez zvýšení proudu by mohlo docházet k přerušení svarové lázně, což je v energetickém průmyslu zcela vyloučené.

Tabulka 13 Parametry návaru 3 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO | Os. vzd. [mm]     | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-----|-------------------|------------|
| 3      | 150              | 16,2  | 6,4                                | 0,03                       | 267                           | 5,7               | 0,5 | 12                | 13,5       |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |     |                   |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] |     | Výška návaru [mm] |            |
| 3      | 55237            |       | 13482                              |                            | 19,6                          | 137               |     | 1,8               |            |



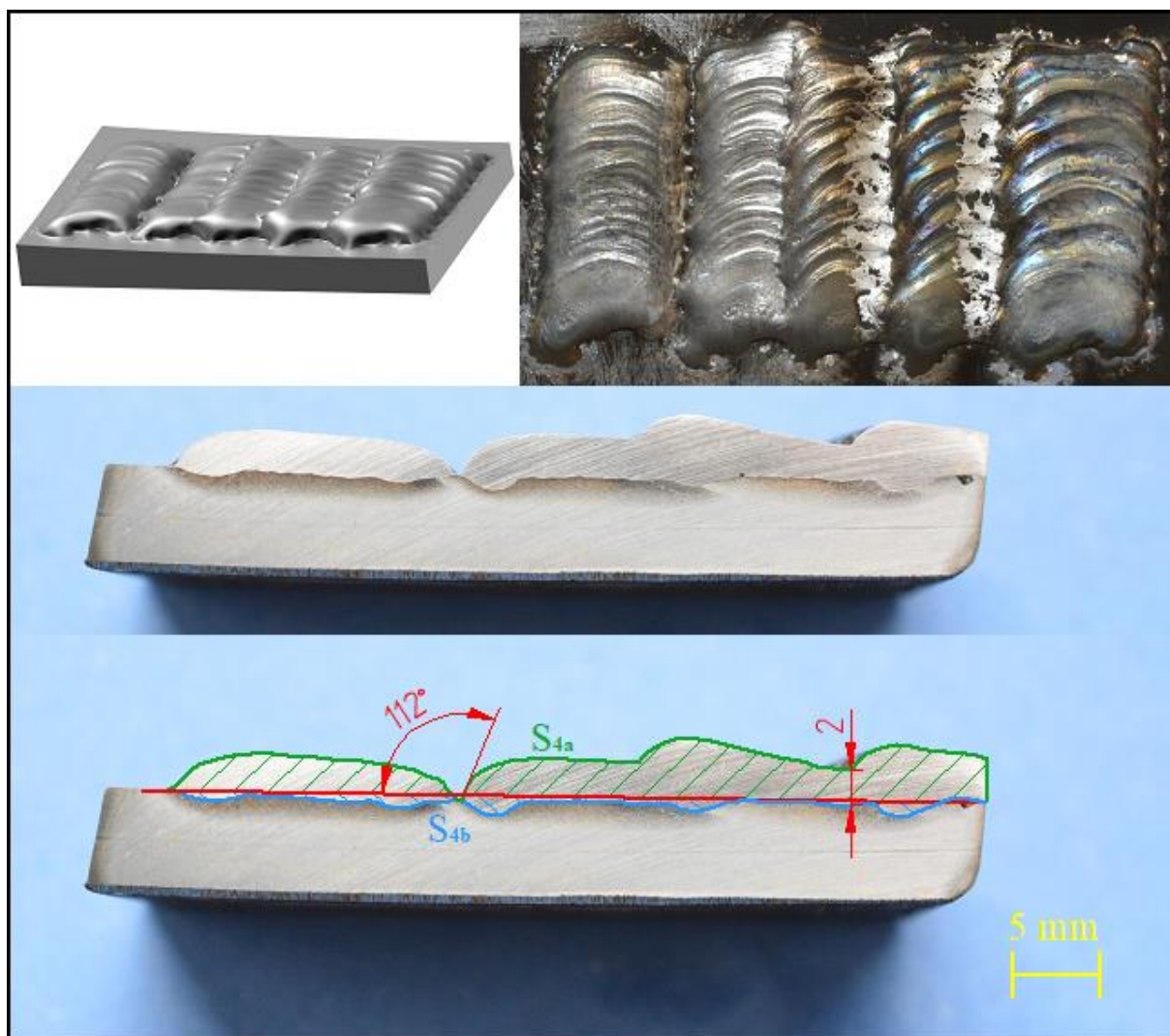
Obr. 57 Návar 3 s rozkyvem [vl. tvorba]



Návar 4 je ukázán na obrázku 58 a jeho parametry jsou v tabulce 14. První je oddělen od ostatních z důvodu nastavení osové vzdálenosti 14,7 mm, což se ukázalo jako zcela nedostatečné a u dalších vrstev byla tato vzdálenost upravena na 12,3 mm. Na obrázku makrostruktury je návar vpravo mírně oddělený při dělení materiálu, to však pro výpočet zředění nic nemění a návarových vrstev je dostatek pro pozorování. Hodnoty proudu byly nastaveny na 200 A a rychlost navařování byla 445 mm za minutu. Geometrie návaru začíná být odlišná od předchozích. Při nižších hodnotách proudu byl tvar spíše konvexní, zatímco při hodnotách návaru 4 je tvar plochý. V nejnižším bodě byla při pozorování makrostruktury naměřena výška 2 mm. Tato hodnota je limitní a přechod mezi jednotlivými návary je výraznější než u předchozích vzorků. Zředění dosahuje 16,7 %, což už je poměrně dost.

Tabulka 14 Parametry návaru 4 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I<br>[A]                 | U<br>[V] | $v_{dratu}$<br>[m · min <sup>-1</sup> ] | $v_r$<br>[m · s <sup>-1</sup> ] | $v_z$<br>[mm · min <sup>-1</sup> ] | KPD                  | KDO | Os. vzd.<br>[mm]     | šířka<br>[mm] |
|--------|--------------------------|----------|---|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----|----------------------|---------------|
| 4      | 200                      | 17,7     | 9                                       | 0,05                            | 445                                | 5,7                  | 0,5 | 12,3                 | 16,2          |
| Vzorek | Bez měřítka              |          |   |                                 | Skutečné hodnoty                   |                      |     |                      |               |
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ] |          | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ]                |                                 | $Z_{sk}$ [%]                       | Kontakt.<br>úhel [°] |     | Výška návaru<br>[mm] |               |
| 4      | 51608                    |          | 10365                                   |                                 | 16,7                               | 112                  |     | 2                    |               |

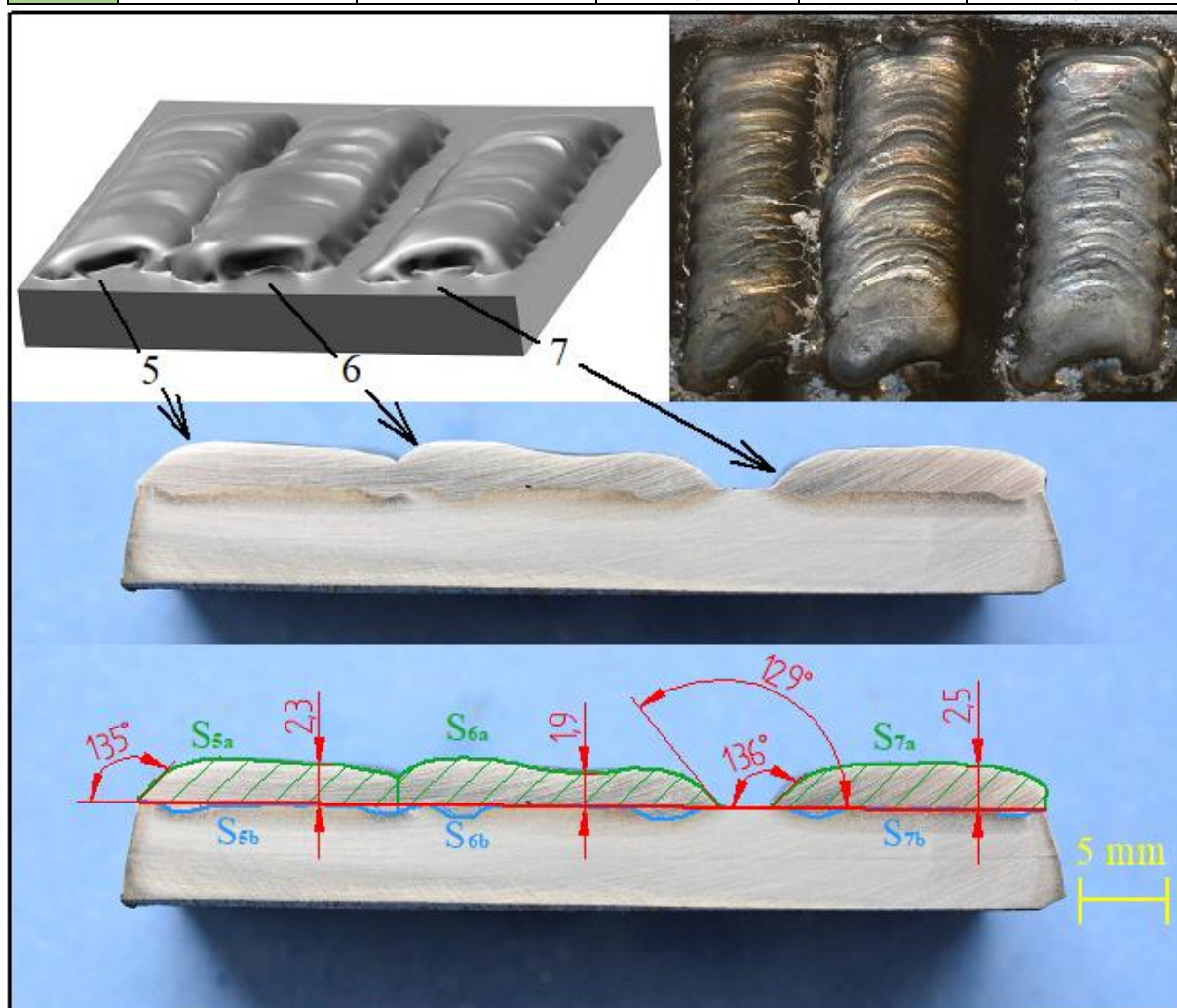


Obr. 58 Návar 4 s rozkyvem [vl. tvorba]

Další návary byly provedeny samostatně, protože byla zkoušena změna geometrie návaru pro různá nastavení KPD a KDO při stejném proudovém zatížení. Nastavované parametry jsou v tabulce 15 a návary na obrázku 59. Protože jsou návary blízko sebe, byly vyhotoveny jako jeden metalografický výbrus. U návaru 5 byla změněna KDO z 0 na 3 a KPD zůstala na hodnotě 5,7. Geometrie návaru nebyla jednoznačně změněna, a tak pro pozorovatelný rozdíl byly u návaru 6 obě korekce vynulovány. Na makrostruktuře návaru 6 je pozorovatelná prohlubeň uprostřed. U návaru číslo 7 byla KPD zvýšena na 8, což vedlo ke zlepšení tvaru.

Tabulka 15 Parametry návarů 5, 6, 7 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO               | Os. vzd. [mm] | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------|
| 5      | 200              | 17,7  | 9                                  | 0,05                       | 445                           | 5,7               | 3                 | -             | -          |
| 6      | 200              | 17,7  | 9                                  | 0,05                       | 445                           | 0                 | 0                 | -             | -          |
| 7      | 200              | 17,7  | 9                                  | 0,05                       | 445                           | 8                 | 0                 | -             | -          |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |                   |               |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] | Výška návaru [mm] |               |            |
| 5      | 15801            |       | 2040                               |                            | 11,4                          | 135               | 2,3               |               |            |
| 6      | 19306            |       | 2642                               |                            | 12,0                          | 129               | 1,9               |               |            |
| 7      | 17586            |       | 1190                               |                            | 6,3                           | 136               | 2,5               |               |            |

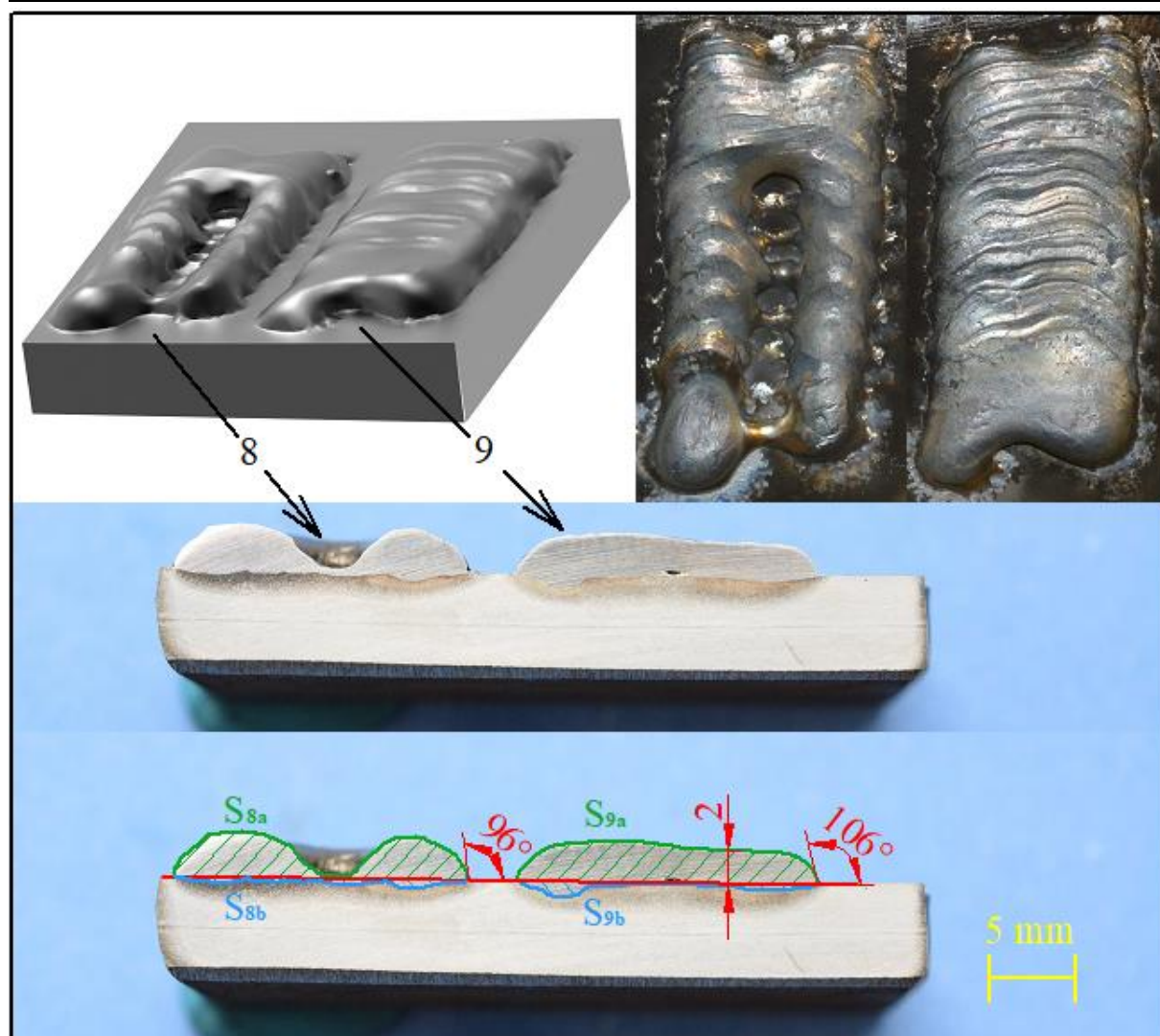


Obr. 59 Návary 5, 6, 7 s rozkyvem [vl. tvorba]

Návary 8 a 9 jsou taktéž provedeny bez překrývání dalšími vrstvami. Jsou na obrázku 60 a jejich parametry jsou v tabulce 16. U návaru 8 byl proud zvýšen na 220 A a rychlost svařování na 668 mm za minutu. Návar byl rozdělen uprostřed, protože parametry byly nízké pro tuto rychlost, proto byl vytvořen návar 9, u kterého zůstala rychlost stejná, ale parametry byly zvýšeny pomocí nastavení proudu na 240 A. U měření je pozorovatelný rozdíl v zředění, který byl snížen u vyššího proudu, ale proud by naopak měl zředění zvětšovat. Je to způsobené tím, že kvůli rozkvyvu dochází k vyššímu promísení na krajích návaru a když byl návar 8 rozdělen, plocha  $S_a$  se zmenšila, ale plocha  $S_b$  zůstala přibližně stejná.

Tabulka 16 Parametry návarů 8 a 9 s rozkvyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO               | Os. vzd. [mm] | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------|
| 8      | 220              | 18,4  | 10                                 | 0,075                      | 668                           | 8                 | 0                 | -             | -          |
| 9      | 240              | 19,4  | 11,3                               | 0,075                      | 668                           | 8                 | 0                 | -             | -          |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |                   |               |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] | Výška návaru [mm] |               |            |
|        | 14418            |       | 2792                               |                            | 16,2                          | 96                | -                 |               |            |
| 9      | 17051            |       | 3135                               |                            | 15,5                          | 106               | 2                 |               |            |



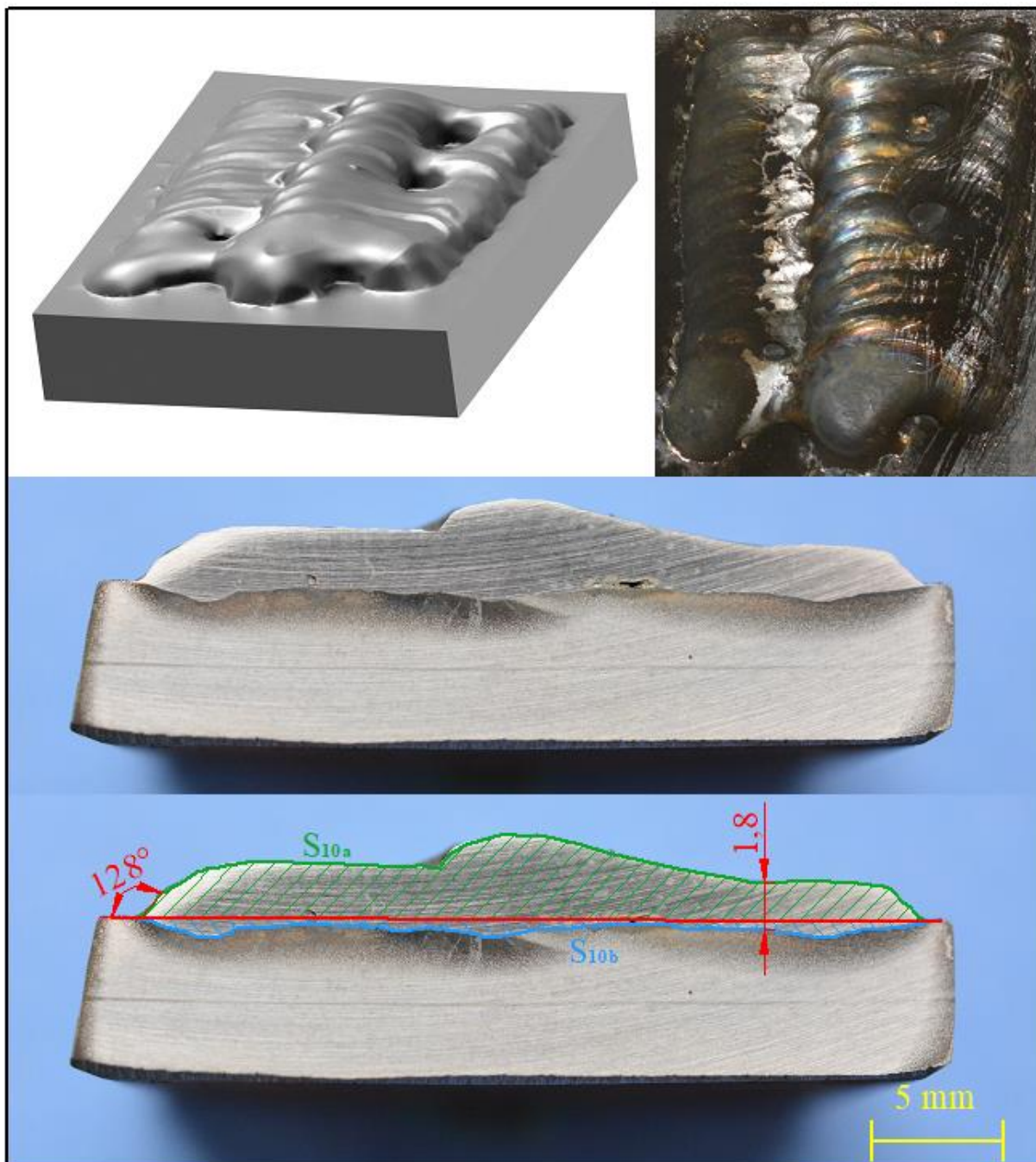
Obr. 60 Návary 8 a 9 s rozkvyvem [vl. tvorba]



Návar 10 je na obrázku 61 a jeho parametry jsou v tabulce 17. U návaru 10 byla zvýšena KPD na 10 s myšlenkou, že návar bude mít vhodnější geometrii pro skládání housenek. Návary však byly uprostřed rozdělené.

Tabulka 17 Parametry návaru 10 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I<br>[A]                 | U<br>[V] | $v_{dratu}$<br>[ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$<br>[ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$<br>[ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD                  | KDO                  | Os. vzd.<br>[mm] | šířka<br>[mm] |
|--------|--------------------------|----------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|
| 10     | 240                      | 19,4     | 11,3                                  | 0,075                         | 668                              | 10                   | 0                    | 12,5             | 16,7          |
| Vzorek | Bez měřítka              |          |                                       |                               | Skutečné hodnoty                 |                      |                      |                  |               |
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ] |          | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ]              |                               | $Z_{sk}$ [%]                     | Kontakt.<br>úhel [°] | Výška návaru<br>[mm] |                  |               |
| 10     | 86951                    |          | 17432                                 |                               | 16,7                             | 128                  | 1,8                  |                  |               |

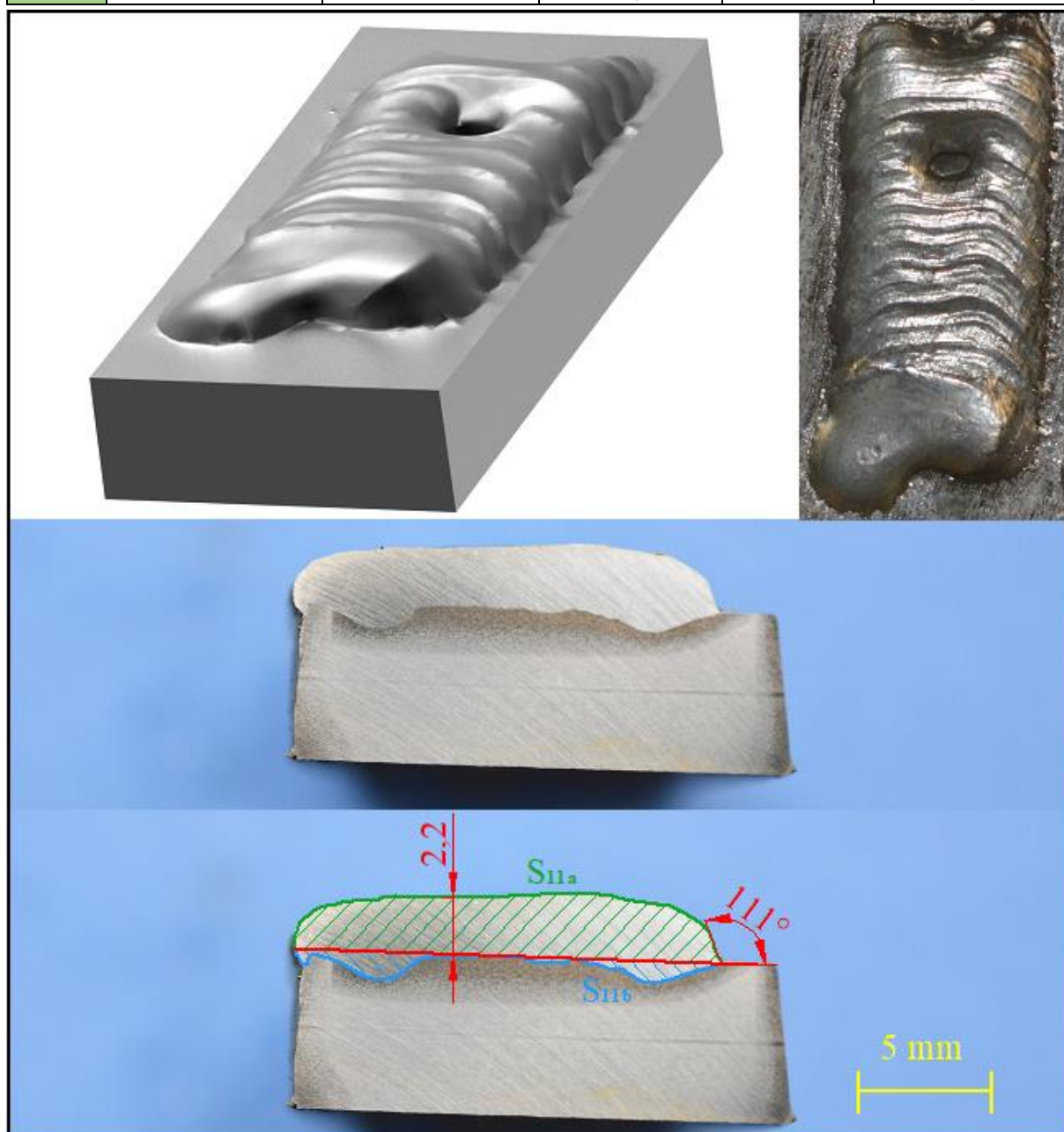


Obr. 61 Návar 10 s rozkyvem [vl. tvorba]

Protože byl návar 10 uprostřed rozdělen a metoda CMT je limitována proudem 250 A, byl proud pro návar 11, který je na obrázku 62, zvýšen o 10 A. Jeho parametry jsou v tabulce 18. I přes to, že byl proud zvýšen, došlo k přerušení svarové lázně. Svařovací rychlost 668 mm za minutu se tedy jeví jako příliš vysoká. Geometrie návaru stále není zcela vhodná pro napojování dalších housenek.

Tabulka 18 Parametry návaru 11 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I [A]            | U [V] | $v_{dratu}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$ [ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD               | KDO | Os. vzd. [mm]     | šířka [mm] |
|--------|------------------|-------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-----|-------------------|------------|
| 11     | 250              | 19,9  | 12                                 | 0,075                      | 668                           | 10                | 0   | -                 | -          |
| Vzorek | Bez měřítka      |       |                                    |                            | Skutečné hodnoty              |                   |     |                   |            |
|        | $S_a$ [ $mm^2$ ] |       | $S_b$ [ $mm^2$ ]                   |                            | $Z_{sk}$ [%]                  | Kontakt. úhel [°] |     | Výška návaru [mm] |            |
| 11     | 47447            |       | 8467                               |                            | 15,1                          | 111               |     | 2,2               |            |



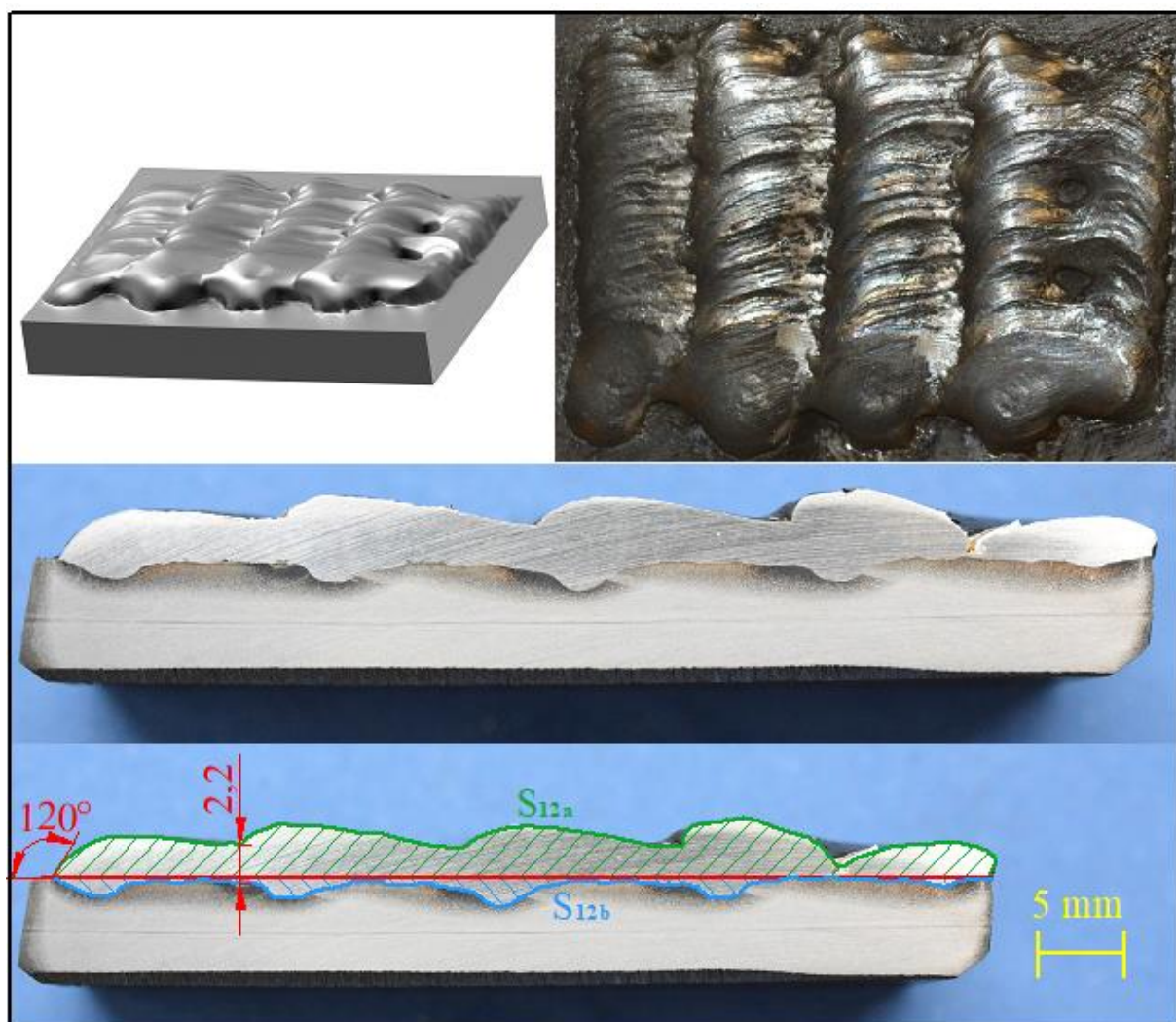
Obr. 62 Návar 11 s rozkyvem [vl. tvorba]



Z hlediska ekonomiky je výhodné mít co nejlepší přechody mezi návary kvůli maximálnímu zaplnění svarového kovu do určité výšky, ale také dosahovat co nejvyšších svařovacích rychlostí. Z těchto důvodů byla pro návar 12, který má parametry v tabulce 19 a je znázorněn na obrázku 63, snížena navařovací rychlost pouze o 45 mm za minutu. V prvních housenkách byl návar v pořádku, ale v poslední vrstvě byla svarová lázeň opět přerušena. Přechody mezi jednotlivými vrstvami byly poměrně výrazné, což tvořilo vysoké výstupky. Nejnižší výška návaru je 2,2 mm a rozdíl k nejvyššímu výstupku je 1,1 mm což převyšuje předepsané maximální 3 mm. Důvodem, proč byly první návary nepřerušené a u posledního docházelo k přerušení, může být vysoká hodnota KPD, protože při kladných hodnotách dochází ke snížení zkratového proudu, což vede k nestabilitě oblouku, zároveň to však přispívá k vhodnější geometrii pro napařování.

Tabulka 19 Parametry návaru 12 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I<br>[A]                 | U<br>[V] | $v_{dratu}$<br>[m · min <sup>-1</sup> ] | $v_r$<br>[m · s <sup>-1</sup> ] | $v_z$<br>[mm · min <sup>-1</sup> ] | KPD                  | KDO                  | Os. vzd.<br>[mm] | šířka<br>[mm] |
|--------|--------------------------|----------|---|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|
| 12     | 250                      | 19,9     | 12                                      | 0,07                            | 623                                | 10                   | 0                    | 12,5             | 16,6          |
| Vzorek | Bez měřítka              |          |   |                                 | Skutečné hodnoty                   |                      |                      |                  |               |
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ] |          | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ]                |                                 | $Z_{sk}$ [%]                       | Kontakt.<br>úhel [°] | Výška návaru<br>[mm] |                  |               |
| 12     | 64114                    |          | 11793                                   |                                 | 15,5                               | 120                  | 2,2                  |                  |               |

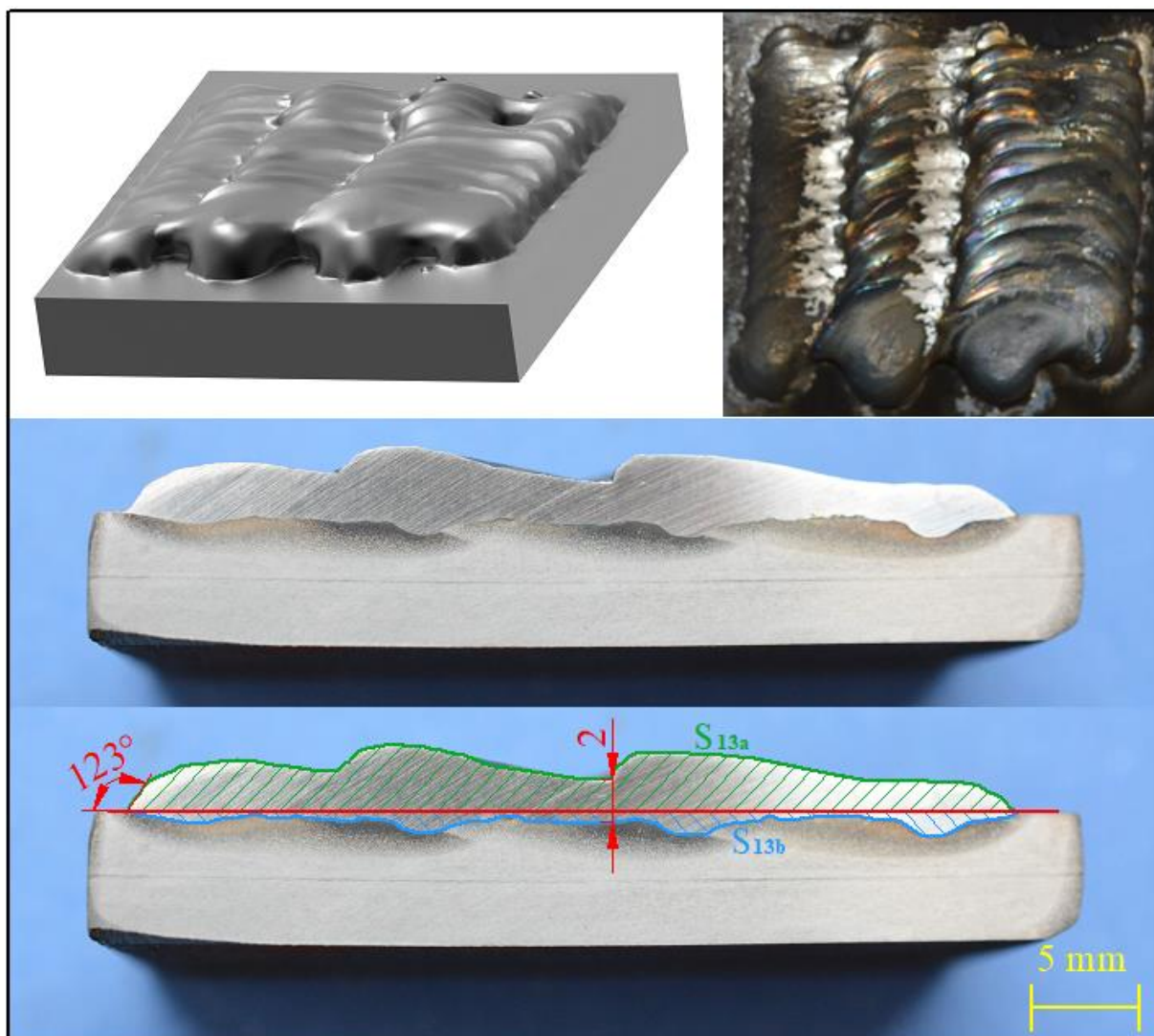


Obr. 63 Návar 12 s rozkyvem [vl. tvorba]

Návar číslo 13 je na obrázku 64 a jeho parametry jsou v tabulce 20. Pro tento návar byl snížen proud, svařovací rychlost i hodnota KPD. I přes tyto změny nebylo dosaženo optimálních výsledků. Nejmenší výška návaru je 2 mm a nejvyšší je o 1,6 větší. Přechody mezi návary jsou opět velice ostré a zředění dosahuje 19,4 %. Dalšími možnými změnami by mohlo být nastavení rozkyvu, spíše to ale vypadá, že pro dosažení lepších tvarů návaru bude muset být snížen proud a společně s ním pomocí synergie i ostatní parametry, což sníží i odtavovaný výkon, protože ten je závislý na rychlosti posuvu drátu a průměru elektrody. Zlepšení stability procesu pro eliminaci přerušování svarové lázně by mohlo být umožněno snížením KPD a zvýšením KDO, zároveň by k tomu mohlo přispět i snížení vzdálenosti periody rozkyvu, tím je ale snížena i výsledná svařovací rychlost. Souhrn tabulek parametrů je v příloze 2.

Tabulka 20 Parametry návaru 13 s rozkyvem [vl. tvorba]

| Pokus  | I<br>[A]                 | U<br>[V] | $v_{dratu}$<br>[m · min <sup>-1</sup> ] | $v_r$<br>[m · s <sup>-1</sup> ] | $v_z$<br>[mm · min <sup>-1</sup> ] | KPD                  | KDO                  | Os. vzd.<br>[mm] | šířka<br>[mm] |
|--------|--------------------------|----------|---|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|
| 13     | 230                      | 18,9     | 10,5                                    | 0,06                            | 534                                | 8                    | 0                    | 12               | 16,3          |
| Vzorek | Bez měřítka              |          |   |                                 | Skutečné hodnoty                   |                      |                      |                  |               |
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ] |          | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ]                |                                 | $Z_{sk}$ [%]                       | Kontakt.<br>úhel [°] | Výška návaru<br>[mm] |                  |               |
| 13     | 68101                    |          | 16342                                   |                                 | 19,4                               | 123                  | 2                    |                  |               |



Obr. 64 Návar 13 s rozkyvem [vl. tvorba]

Pro vzorky 2 a 12 a pro přídavný materiál byl proveden chemický rozbor. V tabulce 21 je chemické složení přídavného materiálu, zprůměrované ze třech měření. Jednotlivá měření jsou v příloze 3.

Tabulka 21 Chemické složení přídavného materiálu [vl. tvorba]

| Prvek | Ti  | Cr   | Fe  | Ni   | Nb  | Mo  |
|-------|-----|------|-----|------|-----|-----|
| Hm. % | 0,3 | 22,1 | 0,5 | 65,6 | 3,2 | 8,3 |

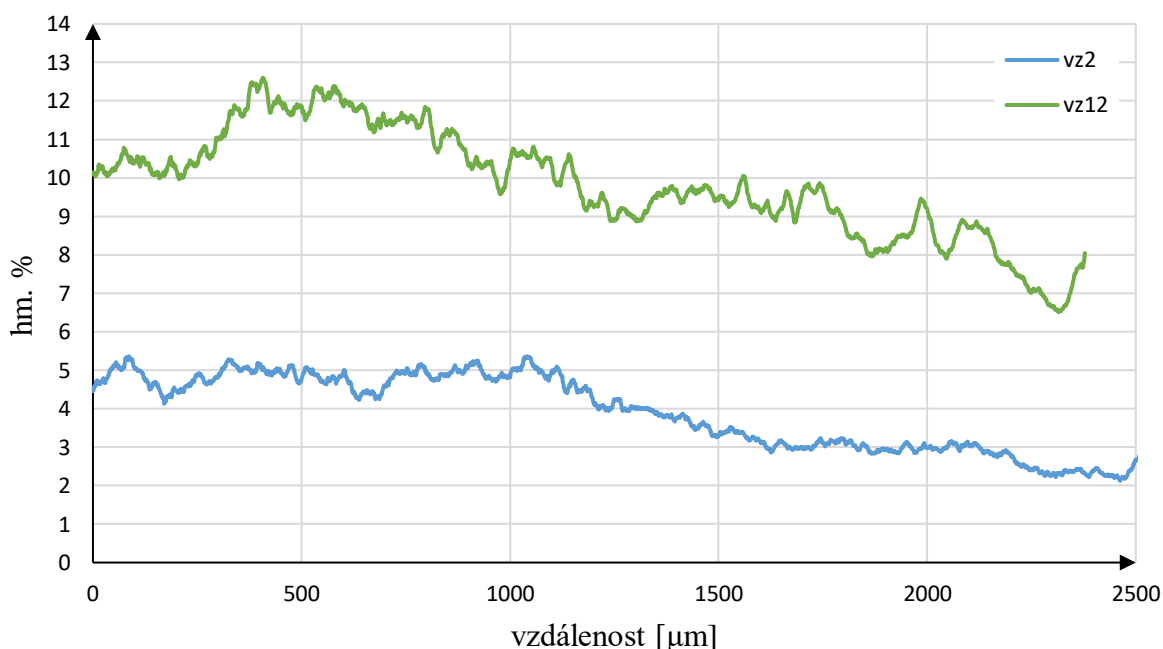
Chemické složení bylo provedeno plošně, na povrchu a liniově na výbrusu. Tabulka 22 ukazuje složení na povrchu pro oba vzorky. Hodnoty jsou zprůměrované ze tří měření.

Tabulka 22 Chemické složení na povrchu vzorků [vl. tvorba]

| Prvek     | Ti  | Cr   | Fe   | Ni   | Nb  | Mo  |
|-----------|-----|------|------|------|-----|-----|
| vzorek 2  | 0,2 | 21,4 | 4,7  | 62,2 | 3,4 | 8,2 |
| vzorek 12 | 0,2 | 20,2 | 10,8 | 57,9 | 3,2 | 7,8 |

Nejdůležitější prvek z hlediska zabezpečení proti vysokoteplotní korozi je železo, jeho chemické složení by mělo být co nejnižší. Jeho koncentrace je ovlivněna promísením se základním materiálem. Z těchto důvodů je důležité dosáhnout co nejmenšího zředění a při navařování co nejrychleji odvádět teplo. To je prováděno chlazením. V Grafu 1 je závislost hmotnostních procent na vzdálenosti od povrchu návaru pro vzorek 2 a 12. Vzorek 2 byl nastaven na 130 A a vzorek 12 byl nastaven na 250 A. V příloze 4 jsou vyhodnoceny všechny prvky vyskytující se v materiálu v závislosti na vzdálenosti.

Graf 1 závislost Fe na vzdálenosti od povrchu [vl. tvorba]



Jako nejvhodnější nastavení svařovacího proudu z hlediska geometrie návaru se jeví rozmezí 150 - 200 A. Z hlediska zředění také. Napojování návarů je velice problematické, a proto bylo provedeno další navařování.



#### 4.3.4 Navařování s rozkyvem 2

Po vyhodnocení prvních návarů s rozkyvem byla uskutečněna další navařování, která jsou zobrazena na obrázku 65. Pro posledních 6 návarů byla změněna trajektorie pohybu.

V programovacím zařízení byl pro pohyb robota zvolen režim plynulého navazování drah, se kterým se nedostává do ostrých změn v úvratích rozkvy, ale místo toho je dráha přepočítána se zaoblením. Tuto dráhu si robot nastavuje sám, a není možné zjistit přesnou trajektorii. Z těchto důvodů musel být změřen čas mezi počátkem a koncem navařování a rychlost ve svislé ose je vypočítána podle vzorce (4.3). Do výpočtu vstupuje čas a známá dráha, která je v ose z 36 mm. Pro výbrus byl zvolen závěrečný návar 19, jehož parametry jsou zaznamenány v tabulce 23. Šířka rozkvy byla pro tento vzorek nastavena na 18 mm a vzdálenost mezi každou periodou zůstává 3 mm. Průměrné hodnoty proudů a napětí vyhodnotí svařovací zařízení, vždy po ukončení procesu a hodnoty mohou být použity pro výpočet vneseného tepla podle vzorce (2.3). Tyto hodnoty jsou společně se změřeným časem zaznamenány také v tabulce 23. Na obrázku 66 je makrostruktura s rozměry. Z důvodu prohnutého vzorku je rovina navařování shodná se spodní hranou vzorku a přenesena. V příloze 5 je návar 19 bez popisků a s rozměry pod mikroskopem.

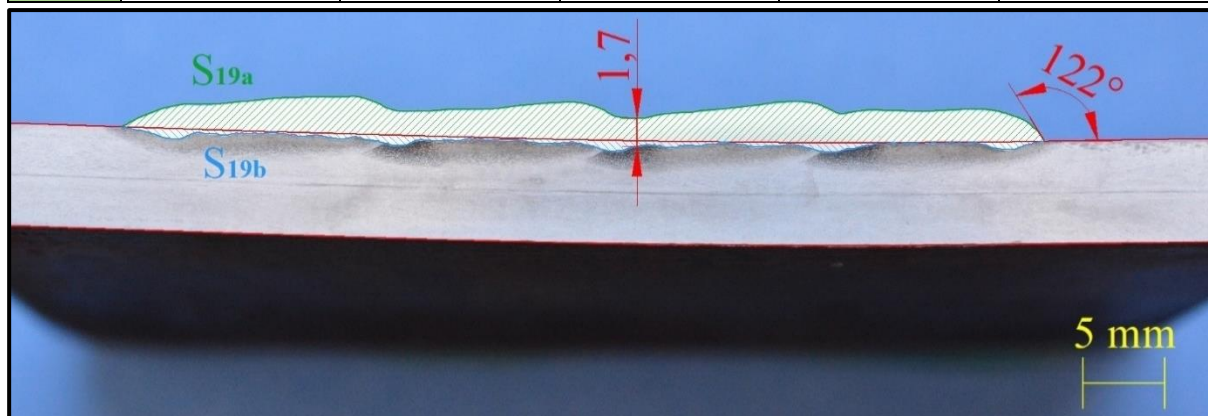


Obr. 65 Ukázka druhých návarů [vl. tvorba]

prouto vzorek nastavena na 18 mm a vzdálenost mezi každou periodou zůstává 3 mm. Průměrné hodnoty proudů a napětí vyhodnotí svařovací zařízení, vždy po ukončení procesu a hodnoty mohou být použity pro výpočet vneseného tepla podle vzorce (2.3). Tyto hodnoty jsou společně se změřeným časem zaznamenány také v tabulce 23. Na obrázku 66 je makrostruktura s rozměry. Z důvodu prohnutého vzorku je rovina navařování shodná se spodní hranou vzorku a přenesena. V příloze 5 je návar 19 bez popisků a s rozměry pod mikroskopem.

Tabulka 23 Parametry návaru 19 [vl. tvorba]

| Pokus  | I<br>[A]                                 | U<br>[V] | $v_{dratu}$<br>[ $m \cdot min^{-1}$ ] | $v_r$<br>[ $m \cdot s^{-1}$ ] | $v_z$<br>[ $mm \cdot min^{-1}$ ] | KPD                  | KDO                  | Os. vzd.<br>[mm]             | šířka<br>[mm] |
|--------|--|----------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|---------------|
| 19     | 190                                      | 17,5     | 8,6                                   | 0,06                          | 315                              | -4                   | 10                   | 12,5                         | 14            |
| Vzorek | Bez měřítka                              |          |                                       |                               | Skutečné hodnoty                 |                      |                      |                              |               |
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ]                 |          | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ]              |                               | $Z_{sk}$ [%]                     | Kontakt.<br>úhel [°] | Výška návaru<br>[mm] |                              |               |
| 19     | 37764                                    |          | 5159                                  |                               | 12                               | 122                  | 1,7                  |                              |               |
|        | Průměrné hodnoty parametrů během procesu |          |                                       |                               |                                  |                      |                      |                              |               |
|        | $I_{pru}$ [A]                            |          | $U_{pru}$ [V]                         |                               | $t_{navaru}$ [s]                 | Dráha [mm]           |                      | $Q$ [kJ · mm <sup>-1</sup> ] |               |
|        | 172                                      |          | 16,2                                  |                               | 6,86                             | 36                   |                      | 0,53                         |               |



Obr. 66 Makrostruktura návaru 19 s popisem [vl. tvorba]

## 5 Závěry

Diplomová práce se zabývá řešením procesních parametrů pro navařování inconelu 625 metodu MAG - CMT. Aplikace navařování tohoto ochranného materiálu je využívána energetickým průmyslem. Vysoké uplatnění je především pro spalovny odpadů, kde vlivem extrémních podmínek při spalování dochází k rychlé degradaci stěn kotlů, které jsou tvořeny membránovými stěnami.

V první fázi experimentu bylo zjištěno, že navařování bez rozkyvu nebude možné pro tyto aplikace z důvodu nastavené synergie od výrobce pro vytvoření malého promísení. Návary byly konvexní a kontaktní úhel byl menší než  $90^\circ$ .

Při navařování s rozkyvem vstupuje do procesu mnoho faktorů, které je velice obtížné nastavit pro vyhovující geometrii a promísení. Geometrie je posuzována z hlediska výšky návaru a možnosti navázat sousední návary, kvůli vytvoření celistvé vrstvy. V první části experimentu s rozkyvem bylo zjištěno, že nejvhodnější parametry nastavení synergického režimu jsou 150 až 200 A. Korekce pulzní dynamiky a korekce délky oblouku byly následně optimalizovány při druhém navařování.

Výsledný návar (vzorek 19) byl vytvořen s parametry 190 A, KDO +10 a KPD -4. Návaznost jednotlivých housenek je příznivá, avšak výška je o něco nižší, než by bylo vhodné. Za pomoci získaných dat je možné odhadnout parametry pro dosažení kvalitnějších návarových vrstev a úpravu výšky. Nejvhodnější volbou pro získání lepších výsledků je změna zrychlení u rozkyvu, která z obtížnosti programování a časových možností nebyla použita. Na okrajích každého návaru je patrné vyšší zředění než uprostřed. Se změnou rychlostí pro kraje a střed, tak aby hořák setrval delší čas v místech s nižším zředěním a kratší čas než doposud v krajích, by se zředění vyrovnalo, výška návaru uprostřed by se zvýšila a u krajů by došlo ke zlepšení kontaktního úhlu pro vhodné kladení dalších návarů.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] *CMT - cold metal transfer: Studený svařovací proces pro nejvyšší kvalitu* [online]. Praha [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/fronius-welding-processes/cmt>
- [2] LÉBLOVÁ, Kristýna. Exkluzivní záběry z kotle tepelné elektrárny. Za provozu zde teplota dosahuje 1200 stupňů. BORGIS A.S, SEZNAM.CZ A.S., ČTK, DPA, REUTERS A FOTOBANKA PROFIMEDIA. *Novinky.cz* [online]. 2019 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/koktejl/clanek/exkluzivni-zabery-z-kotle-tepelne-elektrarny-za-provozu-zde-teplota-dosahuje-1200-stupnu-40285845>
- [3] HRACHOVINA, Petr. BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O. *Nové směry ve vývoji materiálů pro energetiku*. Brno, 2008, 36 s.
- [4] MEERANER DAMPFKESSELBAU GMBH. [svařenec membránové stěny]. In: MEERANER DAMPFKESSELBAU GMBH. *MEERANER* [online]. Zwickauer (Germany) [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: [https://www.mdkb.de/wp-content/uploads/2018/05/IMG\\_7248-Kopie-634x423.jpg](https://www.mdkb.de/wp-content/uploads/2018/05/IMG_7248-Kopie-634x423.jpg)
- [5] CMT TPS/i push-pull welding torch. In: *Fronius Perfect Welding* [online]. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/cmt-upgrade-060317>
- [6] Spalovani\_skladacka\_8129. RAEN SPOL. S R.O. *Www.raen.cz* [pdf]. Praha, 2008 [cit. 2021-3-24]. Dostupné z: [https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/spalovani\\_skladacka\\_8129.pdf](https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/spalovani_skladacka_8129.pdf)
- [7] DLOUHÝ, Tomáš. PK pr1: Parní kotle. *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT: Parní kotle* [online]. Praha, 2018, , 8 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/02/PK-pr1.pdf>
- [8] DLOUHÝ, Tomáš. StK12: Stavba kotlů - přednáška č.12. *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT: Stavba kotlů* [online]. Praha, 2019, , 8 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/StK-p12.pdf>
- [9] [Kotel s membránovými stěnami]. In: *Energetické centrum Jindřichův Hradec: Výroba elektřiny a tepla z biomasy* [online]. Jindřichův Hradec [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.ecjh.cz/cze/fotogalerie>
- [10] Sulzer\_cladfuse\_protecting\_membrane\_walls\_1. In: *Sulzer* [online]. Winterthur (Švýcarsko) [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.sulzer.com/en/shared/news/190731-sulzer-automated-weld-overlay-repair-improves-efficiency-for-lisahally-biomass-power-plant>
- [11] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
- [12] SIGMUND, Marian. 1. Teoretické základy vzniku svarového spoje, názvosloví ve svařování [pdf]. *VUT-FSI, Ustav strojírenské technologie: Odbor technologie svařování a povrchových úprav*. Brno, 2020. Dostupné po absolvování kurzu HS2 na VUT-FSI.
- [13] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování - I: studijní opora - I část* [pdf]. Brno: VUT-FSI, 2018, 136 s. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_II\\_opora\\_svarovani\\_2018\\_I\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_I_kubicek.pdf)

- [14] SIGMUND, Marian. 2 Rozdělení metod svařování, normy, polohy svařování [pdf]. *VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie: Odbor technologie svařování a povrchových úprav*. Brno, 2018, 23 s. Dostupné po absolvování kurzu ETV na VUT-FSI.
- [15] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. : il. ISBN 80-214-2683-7.
- [16] NOVÁ, Iva. Technologie I: Přednáška 10 - Svařování elektrickým obloukem. *Technická univerzita v Liberci: Fakulta strojní* [pdf]. Liberec, 2018 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=219090&lang=pl>
- [17] SIGMUND, Marian. 8. Technologie svařování TIG - MIG - MAG - FCAW [pdf]. *VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie: Odbor technologie svařování a povrchových úprav*. Brno, 2020, 115 s. Dostupné po absolvování kurzu HS2 na VUT-FSI.
- [18] KOLAŘÍK, Ladislav. Automatizace výrobních procesů: svařování. *ČVUT, fakulta strojní: ústav strojírenské technologie* [online]. **2018**, 70-123 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107516052-Ing-ladislav-kolarik-ph-d-iwe.html>
- [19] *ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering*. 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. : il, čb. fot. ISBN 0-87170-382-3.
- [20] Druhy cívek pro dráty MIG/MAG. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2009 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2009010502>
- [21] Cívkový adaptér. In: *Chem-weld* [online]. Roudnice nad Labem [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/Civkovy-adapter-d941.htm>
- [22] KUBÍČEK, Jaroslav. *8.1 Svařování metodou MIG/MAG*. Druhé vydání. Brno, 2021. První vydání dostupné na: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_2\\_svarovani\\_tavne\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf).
- [23] 75 let společnosti Fronius: se svařovací technikou ke světovému úspěchu. *Perfect Welding* [online]. 2020, , 43 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: [https://www.flipsnack.com/fronius/screen\\_magpw\\_cs-2020-1021a/full-view.html](https://www.flipsnack.com/fronius/screen_magpw_cs-2020-1021a/full-view.html)
- [24] Svařovací procesy od společnosti Fronius: inovativní a efektivní. *Fronius Perfect Welding* [online]. Praha [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy#!/tabs/a3b63ee5-884c-4215-b566-50204ede2754>
- [25] Metoda svařování MIG/MAG. *EWM: we are welding* [online]. Deutschland, Mündersbach [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html>
- [26] Canadian centre for welding + joining. *CCWJ* [online]. 2012 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://sites.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/index4.html>
- [27] Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ s.r.o. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)
- [28] CMT upgrade for TPS/i robotics power source. *Fronius: Perfect Welding* [online]. 2016 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/tisk/cmt-upgrade-060317>
- [29] CMT. *Fronius: Perfect Welding* [pdf]. Praha, , 16 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/polozky-ke-stazeni#!/searchconfig/%7B%22countryPath%22%3A%22%2Fsitecore%2Fcontent%2>

FCzech%20Republic%22%2C%22language%22%3A%22cs-CZ%22%2C%22token%22%3A%22sp8mgx7ijodmn7duf4h5r%22%2C%22id%22%3A%22cfde9025-87ff-4024-a50d-c4be7a28f159%22%2C%22activeDepartment%22%3Anull%2C%22initialSearch%22%3Atrue%2C%22searchword%22%3A%22cmt%22%2C%22selectedCountry%22%3A%22Czech%20Republic%22%2C%22dateStart%22%3Anull%2C%22dateEnd%22%3Anull%7D

- [30] MEDUNA, Martin. FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *Inovace svářecích zařízení pro metodu MIG/MAG*. Jihlava, 54 s.
- [31] FELIX, Michal. FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *Cold Metal Transfer (CMT)*. Jihlava, 2008.
- [32] EDOH IMOUDU, Nelson, Y. AYELE a A. BARABADI. *The characteristic of cold metal transfer (CMT) and its application for cladding*. 2017, 1883 s. Dostupné z: doi:10.1109/IEEM.2017.8290218
- [33] OLA, O.T. a F.E. DOERN. A study of cold metal transfer clads in nickel-base INCONEL 718 superalloy. *Materials & Design*. 2014, **57**, 51-59. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.060
- [34] Typy pro MIG/MAG - vedení hořáku. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2009050601
- [35] IWELD IGBT inventory pro svařování a řezání elektrickým obloukem. *Welco* [online]. , 98 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.welco.cz/file/download?id=1841&route\_url\_id=357
- [36] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Vydání první. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-80-260-7132-7.
- [37] PILOUS, Václav a Vladimír KUDĚLKA. *Nikl a slitiny niklu - superslitiny niklu*. Brno: TESYDO, s.r.o, 2017, 62 stran : ilustrace. ISBN 978-80-87102-16-9.
- [38] LOSERTO VÁ, Minika. Progresivní materiály: učební text. *Vysoká škola báňská: Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf
- [39] Nikl, chemický prvek Ni, popis a vlastnosti. *Prvky.com* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: http://www.prvky.com/28.html
- [40] REED, Roger C. *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, xv, 372 s. : il., čb. fot. ; 26 cm. ISBN 978-0-521-85904-2.
- [41] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Ivo HLAVATÝ et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářecích inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-85771-85-3.
- [42] HÖFER, Manfred. BÖHLER SCHWEIßTECHNIK AUSTRIA. *Svařování niklu a slitin na bázi niklu*. 2008, 59 s. Dostupné také z: https://www.kskct.cz/images/katalog/dokumenty-ostatni/dokumentace/Ni%20slitiny%20BW%20C4%8Desky.pdf
- [43] SONDEL, Martin. ČESKÝ SVÁŘEČSKÝ ÚSTAV S.R.O. *Svařování niklu a jeho slitin*. Ostrava, 2017, 14 s.
- [44] HAUŠILD, Petr a Jan SIEGL. Horká trhlina ve svaru u konstrukční oceli. In: FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ ČVUT V PRAZE: KATEDRA

- METERIÁLŮ. *Fraktografické pracoviště* [online]. Praha [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://fraktografie.fjfi.cvut.cz/atlas.html>
- [45] SŁANIA, J., R. KRAWCZYK a SZ WÓJCIK. Examination And Detecting Discontinuities In The Austenite Inconel 625 Layer Used On The Sheet Pile Walls Of The Boiler's Evaporator To Utilize Waste Thermally. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, **60**. Dostupné z: doi:10.1515/amm-2015-0294
- [46] DUTRA, Jair, Nelso BONACORSO, Régis SILVA, Renon CARVALHO a Fernando SILVA. Development of a flexible robotic welding system for weld overlay cladding of thermoelectrical plants' boiler tube walls. *Mechatronics*. 2014, **24**. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2014.03.002
- [47] UTP MAINTENANCE BY VOESTALPINE. *Cladding solutions for the waste to energy industry* [pdf]. UTP MAINTENANCE BY VOESTALPINE. , 12 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: [https://www.voestalpine.com/welding/hu/content/download/7610/150591/file/UTP\\_Waste+to+Energy\\_EN\\_2019\\_GL\\_160\\_Preview.pdf](https://www.voestalpine.com/welding/hu/content/download/7610/150591/file/UTP_Waste+to+Energy_EN_2019_GL_160_Preview.pdf)
- [48] AALTONEN, Ari. *Korroosiotutkimussondin kehittäminen [vývoj sondy pro výzkum koroze]* [online]. Helsinki, finsko: Energia- ja ympäristötekniikka, 2014, 41 s. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/81310/Korroosiotutkimussondin%20kehittäminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Vedoucí práce Juha Kotamies, Jukka Mäkinen. Obrázek na straně 17.
- [49] *CI corrotherm: international* [online]. Totton, UK [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.corrotherm.co.uk/grades/inconel-625>
- [50] *Jiaxing MT stainless steel co (MTSCO): Austenic/Duplex/Nickel alloys* [online]. 2006 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: [http://www.mtstainlesssteel.com/Inconel\\_625\\_UNSN06625.html](http://www.mtstainlesssteel.com/Inconel_625_UNSN06625.html)
- [51] Böhler FOX nibas 625. In: *Alruqee Group* [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: [https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/03112015000000B\\_Boehler%20FOX%20NIBAS%20625\\_ce.pdf](https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/03112015000000B_Boehler%20FOX%20NIBAS%20625_ce.pdf)
- [52] ZAKUŤANSKÝ, Damián. *Aplikace štihlé výroby v praxi* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/8996667.pdf>. Bakalářská práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ivana Šajdlerová.
- [53] METRO BOILER TUBE CO., INC. *Pema Welder* [online]. In: . [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.metroboilertube.com/>
- [54] STEELNUMBER. 16Mo3. *European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=441](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=441)
- [55] BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O. *Přídavné materiály pro nové oceli pro elektrárny*. 2008, 47 s.
- [56] ZOUHAR, Jan. *Cladding tests*. Brno, VUT, 2020.
- [57] FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *Firmware TPS/i v2.4.2 EN,DE* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ru%C4%8Dn%C3%AD-ova%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/migmag/tpsi/tpsi/tps-500i>



- [58] ALUNOX. AX-625 [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: [https://www.alunox.de/images/datenblaetter/ax\\_625.pdf](https://www.alunox.de/images/datenblaetter/ax_625.pdf)
- [59] LINDE. Cronigon Ni10 [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: [https://produkte.linde-gase.de/db\\_neu/cronigon\\_ni10.pdf](https://produkte.linde-gase.de/db_neu/cronigon_ni10.pdf)
- [60] ŘEHOŘEK, Lukáš. USTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ, VUT. *Chemické složení PM, vz2 a vz12*. Brno, 2021.

## Seznam použitých symbolů

|                               |  |  |
|-------------------------------|--|--|
| $A$                           | tažnost                                | [%]                                      |
| $A_r$                         | relativní atomová hmotnost             | [–]                                      |
| $E$                           | modul pružnosti v tahu                 | [GPa]                                    |
| $F_H$                         | hydrodynamická síla                    | [N]                                      |
| $F_g$                         | gravitační síla                        | [N]                                      |
| $F_m$                         | elektromagnetická síla                 | [N]                                      |
| $F_p$                         | síla vyvolaná tlakem kovových par      | [N]                                      |
| $F_s$                         | síla povrchového napětí                | [N]                                      |
| $G$                           | modul pružnosti ve smyku               | [GPa]                                    |
| $I$                           | proud                                  | [A]                                      |
| $I_p$                         | špičkový proud                         | [A]                                      |
| $I_z$                         | základní proud                         | [A]                                      |
| $L$                           | šířka rozkvyu                          | [mm]                                     |
| $Q$                           | specifické vnesené teplo               | [J · mm <sup>-1</sup> ]                  |
| $R_{(20^\circ\text{C})}$      | elektrický odpor                       | [μΩ · cm]                                |
| $R_m$                         | mez pevnosti                           | [MPa]                                    |
| $R_{p0,2}$                    | smluvní mez kluzu                      | [MPa]                                    |
| $S_a$                         | plocha navařeného kovu bez měřítka     | [mm <sup>2</sup> ]                       |
| $S_b$                         | plocha závaru bez měřítka              | [mm <sup>2</sup> ]                       |
| $S_n$                         | plocha navařeného kovu                 | [mm <sup>2</sup> ]                       |
| $S_z$                         | plocha závaru                          | [mm <sup>2</sup> ]                       |
| $T_T$                         | teplota tání                           | [°C]                                     |
| $T_c$                         | Curieův bod                            | [°C]                                     |
| $T_v$                         | teplota varu                           | [°C]                                     |
| $U$                           | napětí                                 | [V]                                      |
| $Z$                           | vzdálenost periody rozkvyu             | [mm]                                     |
| $Z_{sk}$                      | zředění                                | [%]                                      |
| $s_1$                         | dráha mezi body A a B                  | [mm]                                     |
| $s_2$                         | polovina vzdálenosti periody rozkvyu   | [mm]                                     |
| $t$                           | čas                                    | [s]                                      |
| $v_r$                         | rychlost zadávaná pro robota           | [m · s <sup>-1</sup> ]                   |
| $v_s$                         | svařovací rychlost                     | [mm · s <sup>-1</sup> ]                  |
| $v_z$                         | rychlost v ose svařování               | [m · s <sup>-1</sup> ]                   |
| $\alpha_{(20^\circ\text{C})}$ | součinitel tepelné délkové roztažnosti | [10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup> ]    |
| $\rho_{(T_T)}$                | hustota při teplotě tání               | [kg · m <sup>-3</sup> ]                  |
| $\Delta U_a$                  | úbytek napětí na anodě                 | [V]                                      |
| $\Delta U_{celk}$             | celkový úbytek napětí                  | [V]                                      |
| $\Delta U_k$                  | úbytek napětí na katodě                | [V]                                      |
| $\Delta U_o$                  | úbytek napětí na oblouku               | [V]                                      |
| $\Delta u$                    | odchylka délek                         | [%]                                      |
| $\alpha$                      | kontaktní úhel                         | [°]                                      |
| $\eta$                        | účinnost přenosu tepla                 | [–]                                      |
| $\lambda$                     | tepelná vodivost                       | [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ] |
| $\rho$                        | hustota                                | [kg · m <sup>-3</sup> ]                  |

## Seznam použitých zkratek

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| Al              | hliník                   |
| Ar              | argon                    |
| B               | bór                      |
| C               | uhlík                    |
| Co              | kobalt                   |
| CO <sub>2</sub> | oxid uhličitý            |
| Cr              | chrom                    |
| Cu              | měď                      |
| Fe              | železo                   |
| H <sub>2</sub>  | vodík                    |
| HB              | tvrdost podle Brinella   |
| He              | helium                   |
| Hf              | hafnium                  |
| hm. %           | hmotnostní procenta      |
| HV              | tvrdost podle Vickerse   |
| KDO             | korekce délky oblouku    |
| KPD             | korekce pulzní dynamiky  |
| Mn              | mangan                   |
| Mo              | molybden                 |
| N               | dusík                    |
| Nb              | niob                     |
| Ni              | nikl                     |
| O <sub>2</sub>  | kyslík                   |
| P               | fosfor                   |
| S               | síra                     |
| Si              | křemík                   |
| SK              | svarový kov              |
| Ta              | tantal                   |
| Ti              | titan                    |
| TOO             | tepelně ovlivněná oblast |
| V               | vanad                    |
| W               | wolfram                  |
| ZM              | základní materiál        |
| Zr              | zirkon                   |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 Hořák CMT a ukázky membránových stěn [4] [5][vlastní tvorba] .....    | 9  |
| Obr. 2 Model kotle s membránovými stěnami [9].....                           | 10 |
| Obr. 3 Kotel s membránovými stěnami [9].....                                 | 10 |
| Obr. 4 Navařování membránové stěny [10] .....                                | 11 |
| Obr. 5 Ukázka návaru pro výpočet zředění [11] .....                          | 12 |
| Obr. 6 Rozdělení metod svařování [12] .....                                  | 13 |
| Obr. 7 Princip disociace a ionizace [13] .....                               | 14 |
| Obr. 8 Ukázka ionizovaného plynu [13].....                                   | 14 |
| Obr. 9 Hlavní části oblouku [11] .....                                       | 15 |
| Obr. 10 Rozložení napětí v oblouku [15].....                                 | 15 |
| Obr. 11 VA charakteristika oblouku [11].....                                 | 16 |
| Obr. 12 Síly působící na kapku tavící se elektrody [11].....                 | 16 |
| Obr. 13 Princip svařování MIG/MAG [17].....                                  | 17 |
| Obr. 14 Zařízení pro svařování MIG/MAG [17] [19].....                        | 18 |
| Obr. 15 Plochá charakteristika svařovacího zdroje [17] .....                 | 19 |
| Obr. 16 Dvoukladkové a čtyřkladkové podávací zařízení [11] [18].....         | 19 |
| Obr. 17 Detail tvaru drážek podávacího mechanismu [18].....                  | 20 |
| Obr. 18 Schéma svařovacího hořáku [17].....                                  | 20 |
| Obr. 19 Bezešvá a tvarové profily elektrod [13] .....                        | 21 |
| Obr. 20 Ukázka cívek [21] .....  | 21 |
| Obr. 21 Druhy přenosu kovu [11] [17] .....                                   | 22 |
| Obr. 22 Zkratový oblouk [26] .....   | 22 |
| Obr. 23 Kapkový oblouk [26] .....  | 23 |
| Obr. 24 Sprechový oblouk [26].....   | 23 |
| Obr. 25 Rotující oblouk [26] .....   | 24 |
| Obr. 26 Průběhy impulsního proudu [13] [18].....                             | 24 |
| Obr. 27 Impulsní oblouk [26].....  | 24 |
| Obr. 28 Princip metody CMT [29] .....  | 25 |
| Obr. 29 Průvlak contec [30] .....  | 25 |
| Obr. 30 Oblast výskytu metod CMT [29] .....                                  | 26 |
| Obr. 31 Porovnání MIG a MIG-CMT [31] .....                                   | 27 |
| Obr. 32 Vliv posuvu drátu na Q [32] .....                                    | 27 |
| Obr. 33 Kontaktní úhly pro vhodné navařování [33].....                       | 27 |
| Obr. 34 Závislost tvaru svarové housenky na intenzitě proudu [11].....       | 28 |
| Obr. 35 Závislost tvaru svarové housenky na napětí [11].....                 | 28 |
| Obr. 36 Základní matrice a precipitáty [38] [40].....                        | 32 |
| Obr. 37 Záv. $R_{p0,2}$ na teplotě pro různá množství $\gamma'$ [40].....    | 33 |
| Obr. 38 Trhlina vzniklá za horka [44].....                                   | 34 |
| Obr. 39 Koroze membr. stěny ve spalovně odpadů [48].....                     | 35 |
| Obr. 40 Závislost mechanických vlastností na teplotě Inconelu 625 [50] ..... | 36 |
| Obr. 41 Ukázka membránové stěny [vlastní tvorba] .....                       | 37 |
| Obr. 42 Svařování membránových stěn [53].....                                | 37 |
| Obr. 43 Návar Inconelem 625 [45].....  | 38 |
| Obr. 44 Postup navařování [vlastní tvorba].....                              | 39 |
| Obr. 45 Postup se základními rozměry návaru [45] .....                       | 39 |
| Obr. 46 Svařovací zařízení [vlastní tvorba].....                             | 41 |
| Obr. 47 Svařovací robot Kuka s manipulátorem [vl. tvorba].....               | 41 |
| Obr. 48 synergie 3921 [vlastní tvorba] .....                                 | 42 |



|   |    |
|---|----|
| Obr. 49 Označení návarů bez rozkvyvu [vl. tvorba].....          | 43 |
| Obr. 50 Makrostruktura návaru 6 [vl. tvorba] .....              | 44 |
| Obr. 51 Rozkvyv [vl. tvorba] .....                              | 45 |
| Obr. 52 Označení návarů s rozkvyvem [vl. tvorba].....           | 46 |
| Obr. 53 Metal. pila [vl. tvorba].....                           | 47 |
| Obr. 54 Ukázka fotek s etalonem a bez etalonu [vl. tvorba]..... | 47 |
| Obr. 55 návar 1 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                  | 48 |
| Obr. 56 Návar 2 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                  | 49 |
| Obr. 57 Návar 3 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                  | 50 |
| Obr. 58 Návar 4 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                  | 51 |
| Obr. 59 Návary 5, 6, 7 s rozkvyvem [vl. tvorba].....            | 52 |
| Obr. 60 Návary 8 a 9 s rozkvyvem [vl. tvorba].....              | 53 |
| Obr. 61 Návar 10 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                 | 54 |
| Obr. 62 Návar 11 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                 | 55 |
| Obr. 63 Návar 12 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                 | 56 |
| Obr. 64 Návar 13 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....                 | 57 |
| Obr. 65 Ukázka druhých návarů [vl. tvorba].....                 | 59 |
| Obr. 66 Makrostruktura návaru 19 s popisem [vl. tvorba].....    | 59 |

## Seznam grafů

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 závislost Fe na vzdálenosti od povrchu [vl. tvorba] ..... | 58 |
|--|----|

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 Základní fyzikální vlastnosti niklu [37] [38] [39].....          | 30 |
| Tabulka 2 Rozdělení niklu a slitin niklu [37].....                         | 31 |
| Tabulka 3 Vliv jednotlivých prvků a jejich funkce [36] .....               | 32 |
| Tabulka 4 Chemické složení Inconelu 625 [50].....                          | 36 |
| Tabulka 5 Typické chemické složení elektrody Nibas 625 [51] .....          | 36 |
| Tabulka 6 Výběr materiálů používaných pro membránové stěny [54] [55] ..... | 38 |
| Tabulka 7 Základní parametry zdroje TPS 500i [57] .....                    | 40 |
| Tabulka 8 Chemické složení přídavného materiálu od firmy ALUNOX [58].....  | 40 |
| Tabulka 9 Chemické složení ochranného plynu [59] .....                     | 40 |
| Tabulka 10 Parametry návarů 6 až 10 bez rozkvyvu [vl. tvorba].....         | 44 |
| Tabulka 11 Parametry návaru 1 s rozkvyvem [vl. tvorba].....                | 48 |
| Tabulka 12 Parametry návaru 2 s rozkvyvem [vl. tvorba].....                | 49 |
| Tabulka 13 Parametry návaru 3 s rozkvyvem [vl. tvorba].....                | 50 |
| Tabulka 14 Parametry návaru 4 s rozkvyvem [vl. tvorba].....                | 51 |
| Tabulka 15 Parametry návarů 5, 6,7 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....          | 52 |
| Tabulka 16 Parametry návarů 8 a 9 s rozkvyvem [vl. tvorba] .....           | 53 |
| Tabulka 17 Parametry návaru 10 s rozkvyvem [vl. tvorba].....               | 54 |
| Tabulka 18 Parametry návaru 11 s rozkvyvem [vl. tvorba].....               | 55 |
| Tabulka 19 Parametry návaru 12 s rozkvyvem [vl. tvorba].....               | 56 |
| Tabulka 20 Parametry návaru 13 s rozkvyvem [vl. tvorba].....               | 57 |
| Tabulka 21 Chemické složení přídavného materiálu [vl. tvorba].....         | 58 |
| Tabulka 22 Chemické složení na povrchu vzorků [vl. tvorba] .....           | 58 |
| Tabulka 23 Parametry návaru 19 [vl. tvorba].....                           | 59 |

## **Seznam příloh**

Příloha 1 Makrostruktura návarů 7 a 8 bez rozkvyvu

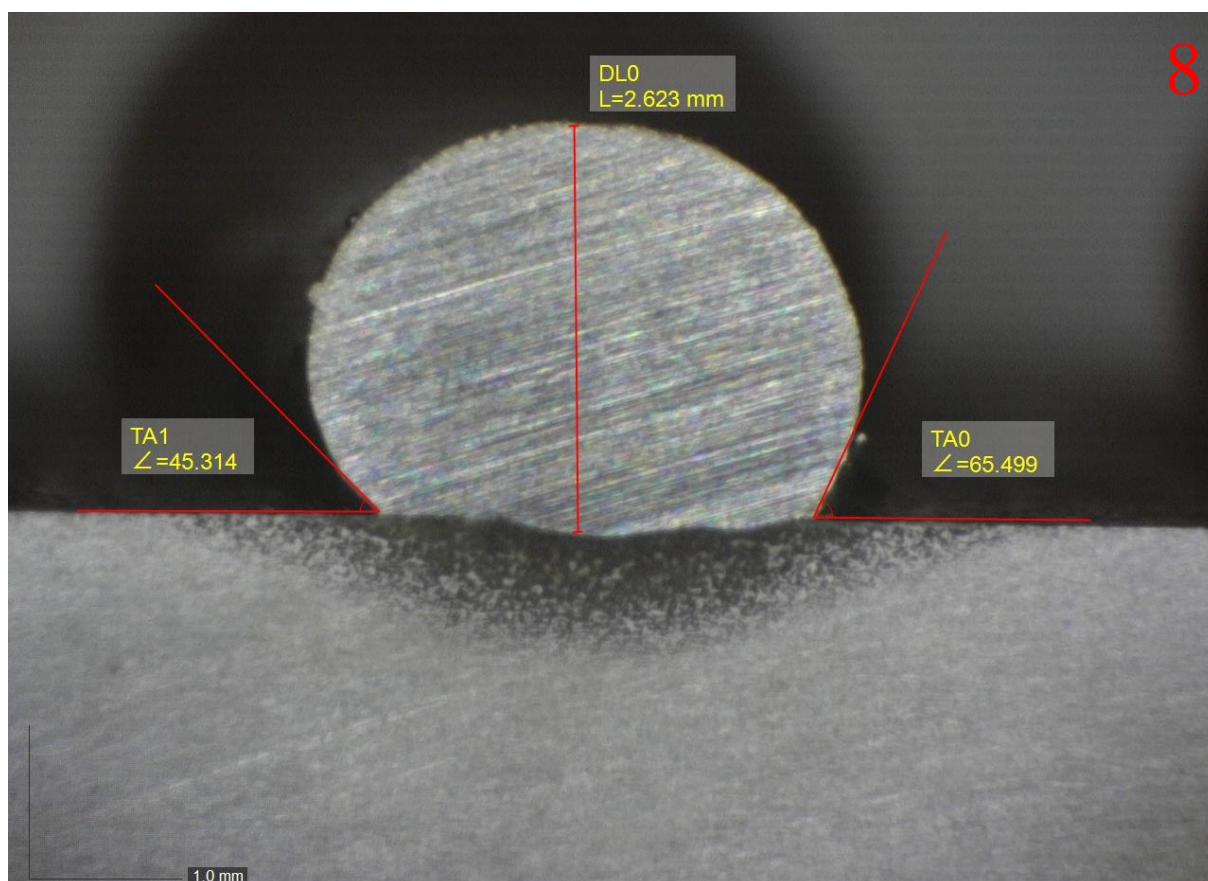
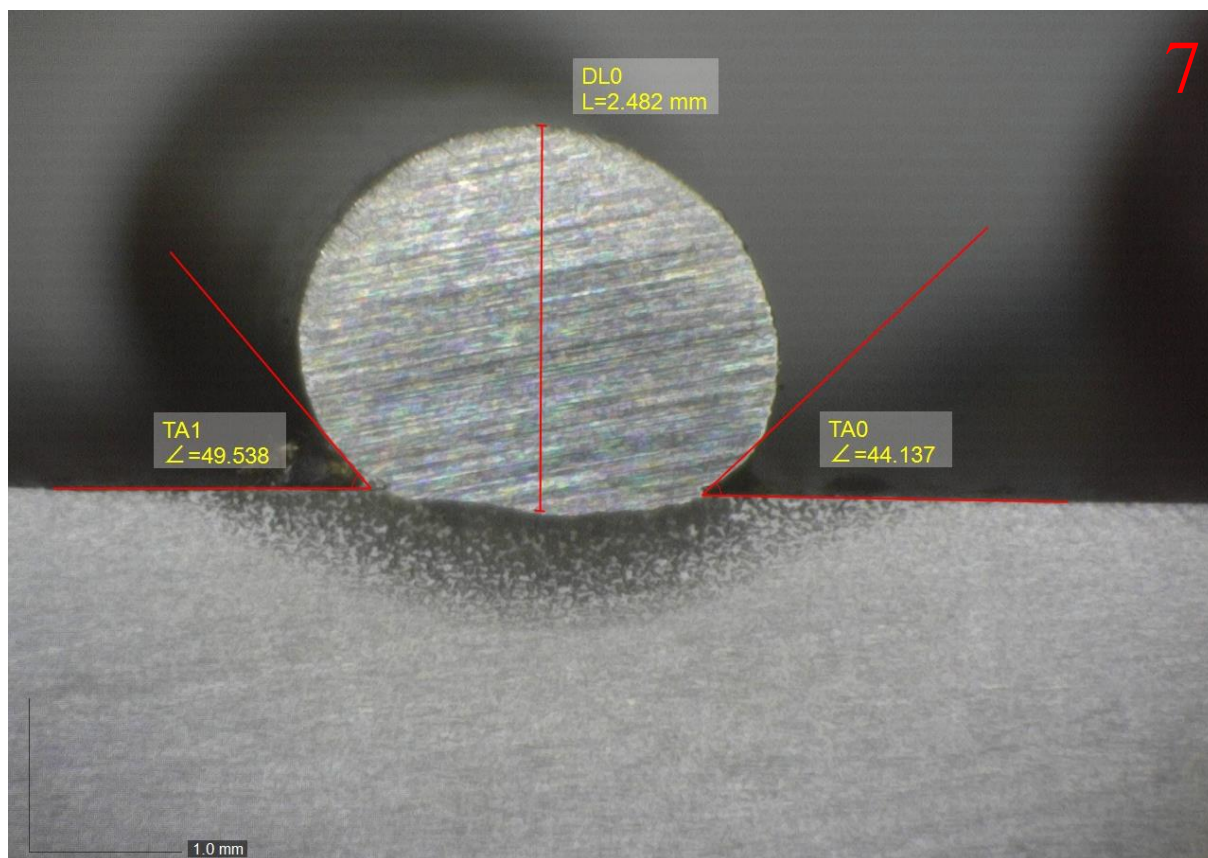
Příloha 2 Souhrnné tabulky prvních parametrů návaru s rozkvyvem

Příloha 3 Chemická složení přídavného materiálu

Příloha 4 Obsah prvků ve vzorku 2 a 12 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Příloha 5 Vzorek 19

## Příloha 1 Makrostruktura návarů 7 a 8 bez rozkvyu



## Příloha 2 Souhrnné tabulky prvních parametrů návaru s rozkyvem

| Pokus | I<br>[A] | U<br>[V] | $v_{dr}$<br>[m · s <sup>-1</sup> ] | $v_z$<br>[mm · min <sup>-1</sup> ] | KPD | KDO | Překrytí | Šířka |
|-------|----------|----------|------------------------------------|------------------------------------|-----|-----|----------|-------|
| 1     | 120      | 14,5     | 4,8                                | 0,02                               | 5,7 | 0,5 | -        | 13    |
| 2     | 130      | 15,2     | 5,3                                | 0,02                               | 5,7 | 0,5 | 10       | 11,4  |
| 3     | 150      | 16,2     | 6,4                                | 0,03                               | 5,7 | 0,5 | 12       | 13,5  |
| 4     | 200      | 17,7     | 9                                  | 0,05                               | 5,7 | 0,5 | 12,3     | 16,2  |
| 5     | 200      | 17,7     | 9                                  | 0,05                               | 5,7 | 3   | -        | -     |
| 6     | 200      | 17,7     | 9                                  | 0,05                               | 0   | 0   | -        | -     |
| 7     | 200      | 17,7     | 9                                  | 0,05                               | 8   | 0   | -        | -     |
| 8     | 220      | 18,4     | 10                                 | 0,075                              | 8   | 0   | -        | -     |
| 9     | 240      | 19,4     | 11,3                               | 0,075                              | 8   | 0   | -        | -     |
| 10    | 240      | 19,4     | 11,3                               | 0,075                              | 10  | 0   | 12,5     | 16,7  |
| 11    | 250      | 19,9     | 12                                 | 0,075                              | 10  | 0   | -        | -     |
| 12    | 250      | 19,9     | 12                                 | 0,07                               | 10  | 0   | 12,5     | 16,6  |
| 13    | 230      | 18,9     | 10,5                               | 0,06                               | 8   | 0   | 12       | 16,3  |

| Vzorek | Bez měřítka              |                          | Skutečné hodnoty |                |                   |
|--------|--------------------------|--------------------------|------------------|----------------|-------------------|
|        | $S_a$ [mm <sup>2</sup> ] | $S_b$ [mm <sup>2</sup> ] | $Z_{sk}$ [%]     | kont. úhel [°] | výška návaru [mm] |
| 1      | 109205                   | 14372                    | 11,6             | 149            | 2,3               |
| 2      | 97245                    | 11587                    | 10,6             | 103            | 2,6               |
| 3      | 55237                    | 13482                    | 19,6             | 137            | 1,8               |
| 4      | 51608                    | 10365                    | 16,7             | 112            | 2                 |
| 5      | 15801                    | 2040                     | 11,4             | 135            | 2,3               |
| 6      | 19306                    | 2642                     | 12,0             | 129            | 1,9               |
| 7      | 17586                    | 1190                     | 6,3              | 136            | 2,5               |
| 8      | 14418                    | 2792                     | 16,2             | 96             | -                 |
| 9      | 17051                    | 3135                     | 15,5             | 106            | 2                 |
| 10     | 86951                    | 17432                    | 16,7             | 128            | 1,8               |
| 11     | 47447                    | 8467                     | 15,1             | 111            | 2,2               |
| 12     | 64114                    | 11793                    | 15,5             | 120            | 2,2               |
| 13     | 68101                    | 16342                    | 19,4             | 123            | 2                 |



### Příloha 3 chemická složení přídatného materiálu

#### Měření 1

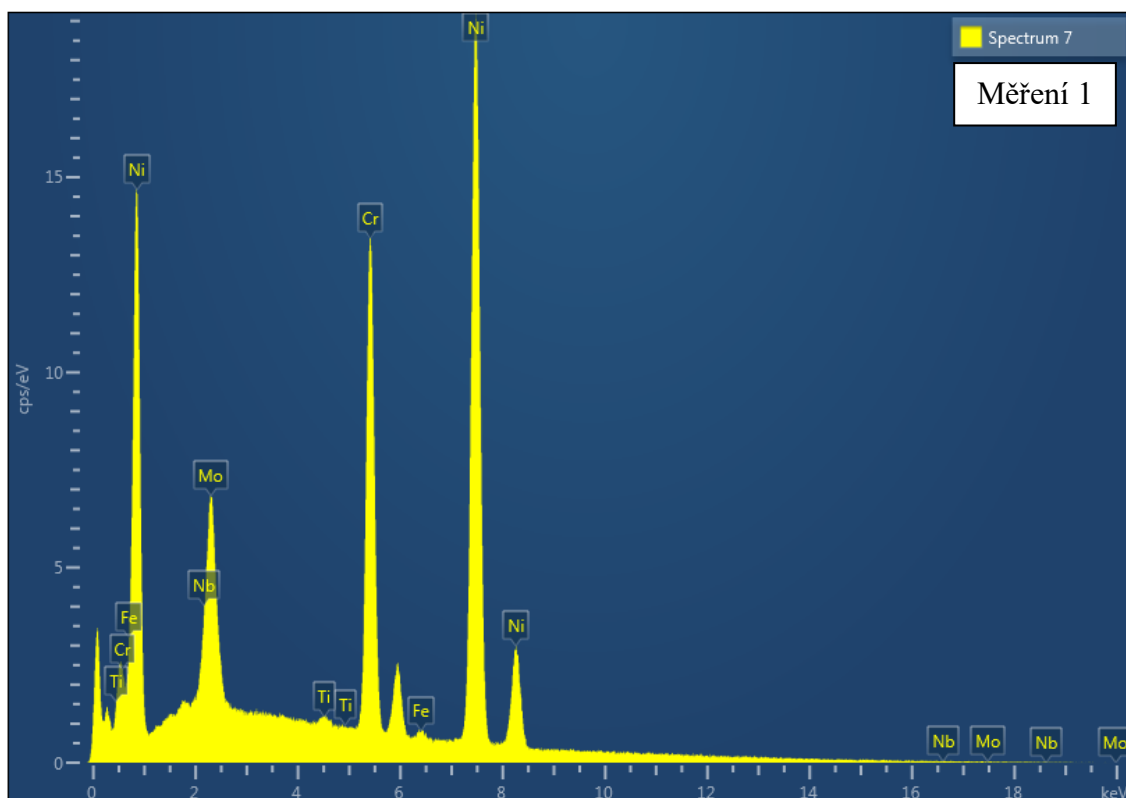
| Element | Line Type | Apparent Concentration | k Ratio | Wt%   | Wt% Sigma |
|---------|-----------|------------------------|---------|-------|-----------|
| Ti      | K series  | 0,26                   | 0,00256 | 0,27  | 0,04      |
| Cr      | K series  | 22,1                   | 0,221   | 22,18 | 0,11      |
| Fe      | K series  | 0,5                    | 0,00499 | 0,49  | 0,05      |
| Ni      | K series  | 62,47                  | 0,62474 | 65,21 | 0,17      |
| Nb      | L series  | 2,18                   | 0,02177 | 3,32  | 0,12      |
| Mo      | L series  | 5,87                   | 0,05872 | 8,53  | 0,13      |

#### Měření 2

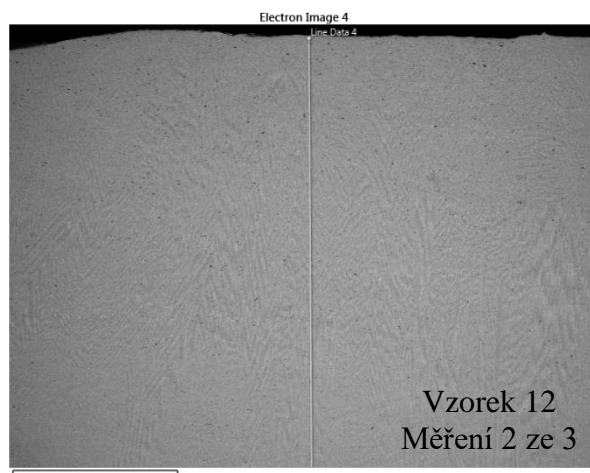
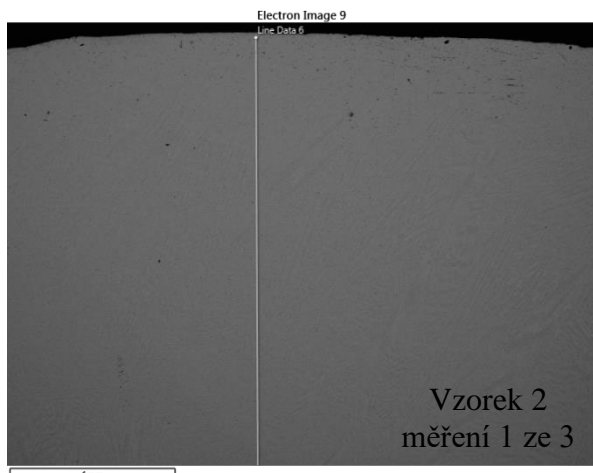
| Element | Line Type | Apparent Concentration | k Ratio | Wt%   | Wt% Sigma |
|---------|-----------|------------------------|---------|-------|-----------|
| Ti      | K series  | 0,26                   | 0,00263 | 0,28  | 0,05      |
| Cr      | K series  | 22,22                  | 0,22225 | 22,22 | 0,12      |
| Fe      | K series  | 0,5                    | 0,00505 | 0,49  | 0,06      |
| Ni      | K series  | 62,82                  | 0,62818 | 65,35 | 0,19      |
| Nb      | L series  | 2,16                   | 0,0216  | 3,29  | 0,14      |
| Mo      | L series  | 5,78                   | 0,05779 | 8,37  | 0,15      |

#### Měření 3

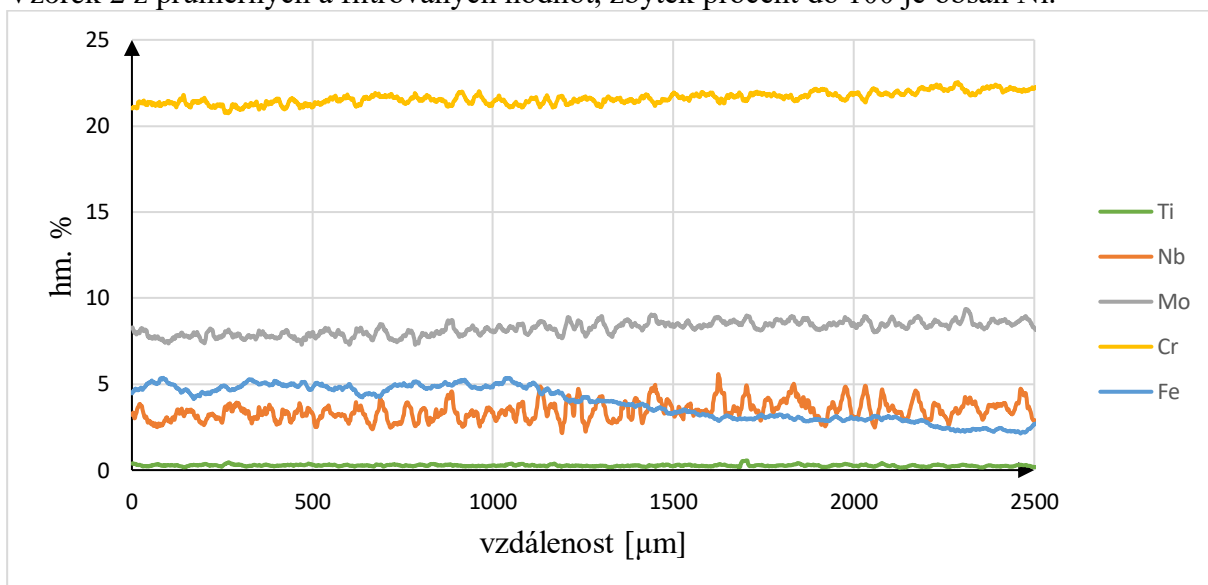
| Element | Line Type | Apparent Concentration | k Ratio | Wt%   | Wt% Sigma |
|---------|-----------|------------------------|---------|-------|-----------|
| Ti      | K series  | 0,25                   | 0,00248 | 0,27  | 0,04      |
| Cr      | K series  | 20,78                  | 0,20784 | 22,01 | 0,11      |
| Fe      | K series  | 0,53                   | 0,00534 | 0,55  | 0,06      |
| Ni      | K series  | 59,89                  | 0,59887 | 66,09 | 0,18      |
| Nb      | L series  | 1,9                    | 0,01896 | 3,07  | 0,12      |
| Mo      | L series  | 5,19                   | 0,05187 | 8     | 0,14      |



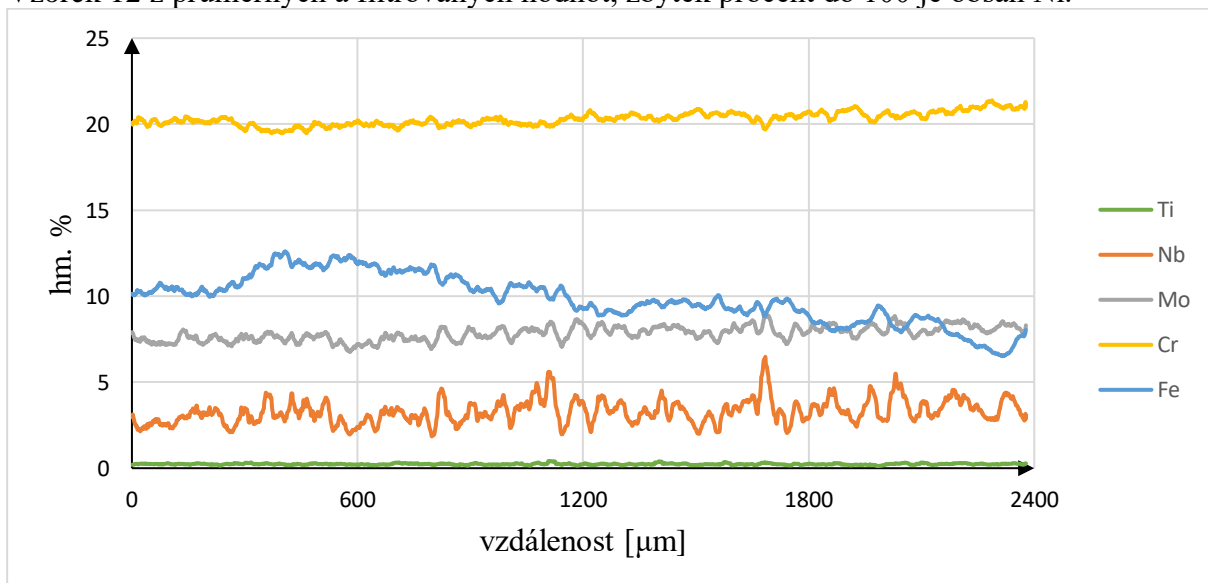
#### Příloha 4 Obsah prvků ve vzorku 2 a 12 v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Vzorek 2 z průměrných a filtrovaných hodnot, zbytek procent do 100 je obsah Ni.



Vzorek 12 z průměrných a filtrovaných hodnot, zbytek procent do 100 je obsah Ni.



## Příloha 5 Vzorek 19

